نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۲۰، مهر - آبان ۱۴۰۵، ص. ۶۱۰-۵۸۷

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 20, Oct.-Nov. 2026, p. 587-610

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی و پیامدهای آن برای حکمرانی منابع آب: مطالعه دشت‌های تایباد و قزوین

نیما مقدم[۱]، مجید خلقی[۲]*، امیرحسین توانا[۳]، افشین اشرف‌زاده[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷

چکیده

در دهه‌های اخیر، افت سطح آب زیرزمینی و افزایش شوری آبخوان‌ها به یکی از مهم‌ترین چالش‌های مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل شده است. بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، توسعه فعالیت‌های کشاورزی و تغییر کاربری اراضی از مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده این روند به شمار می‌روند. بررسی هم‌زمان تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی و ارتباط آن با الگوی کاربری اراضی در بسیاری از دشت‌های کشور کمتر مورد مطالعه اساسی و دقیق قرار گرفته است. هدف این پژوهش تحلیل تغییرات سطح آب زیرزمینی و شوری و بررسی نقش تغییرات کاربری اراضی، در این رابطه، در دو دشت تایباد و قزوین است. در این مطالعه، تغییرات منابع آب زیرزمینی در دشت تایباد طی دوره ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۱ و در دشت قزوین طی دوره ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ بررسی شد. برای این منظور، داده‌های تراز سطح ایستابی، هدایت الکتریکی آب (EC) و نقشه‌های کاربری اراضی با استفاده از روش‌های تحلیل آماری، درون‌یابی مکانی و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که در دشت قزوین سطح آب زیرزمینی به‌طور متوسط سالانه حدود یک متر افت داشته و شوری آب نیز حدود ۶ درصد افزایش یافته است. در دشت تایباد نیز افت سطح آب زیرزمینی با متوسط افت سالانه حدود ۲ متر برآورد شد. شوری آب زیرزمینی طی دوره مطالعه در این دشت حدود ۳ درصد افزایش نشان داد. همچنین بیشترین تغییرات در نواحی شهری و اراضی کشاورزی مشاهده شد که بیانگر نقش مؤثر فعالیت‌های انسانی و تغییرات کاربری اراضی در تشدید روند افت و شوری آبخوان‌ها است.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، دشت تایباد، دشت قزوین، شوری آب، حکمرانی منابع آب

مقدمه

در دهه‌های اخیر، افت تراز آب زیرزمینی و افزایش شوری آبخوان‌ها به یکی از چالش‌های اصلی مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، به‌ویژه ایران، تبدیل شده است. وابستگی شدید بخش کشاورزی و شرب به منابع آب زیرزمینی، همراه با کاهش بارندگی، افزایش تبخیر و برداشت بی‌رویه، موجب تشدید تنش‌های کمی و کیفی آبخوان‌ها شده است (Chen et al., 2016 ؛ مقدم و اشرف‌زاده، ۱۴۰۴). در همین راستا در این پژوهش دو دشت نمونه (یکی مرزی، یکی داخلی) مورد بررسی قرار گرفت. دشت تایباد، یکی از پهنه‌های مهم و راهبردی شرق ایران در استان خراسان رضوی، در مجاورت مرز ایران و افغانستان قرار دارد و از نظر اقلیمی، اجتماعی، اقتصادی و مدیریتی اهمیت ویژه‌ای دارد. گستره دشت عمدتاً شامل اراضی کشاورزی، آبخوان‌های فعال و سکونتگاه‌های روستایی است و به‌عنوان یکی از زیست‌بوم‌های وابسته به منابع آب زیرزمینی شناخته می‌شود. دشت تایباد بخشی از محدوده شهرستان تایباد را شامل می‌شود و مساحت دشت حدود ۲۹۰۰ کیلومتر مربع برآورد شده است.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
۴- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران،کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: kholghi@ut.ac.ir)
DOI: 10.22034/idj.2026.569575.2658

از دیدگاه هیدروژئولوژیکی، این دشت به‌عنوان یک آبخوان نسبتاً مستقل شناخته می‌شود؛ به این معنا که محدوده آن عمدتاً توسط ارتفاعات و ساختارهای زمین‌شناسی پیرامونی کنترل شده و جریان آب زیرزمینی در مقیاس محلی عمدتاً در داخل همین حوضه آبخوانی جریان می‌یابد. محدوده اصلی این آبخوان در بخش‌های میانی و جنوبی شهرستان تایباد قرار دارد. مطالعات انجام‌شده در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که این دشت با افت قابل توجه سطح آب زیرزمینی، افزایش شوری و کاهش میزان تغذیه طبیعی آبخوان مواجه شده است (یزدان‌پناه و همکاران، ۱۳۹۷؛آزادگان و همکاران، ۱۴۰۳). علاوه بر این، وابستگی گسترده فعالیت‌های کشاورزی به منابع آب زیرزمینی، افزایش برداشت از چاه‌ها و شرایط اقلیمی خشک منطقه، موجب تشدید روند افت سطح ایستابی و تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در این دشت شده است.

فخار و کاویانی (۱۴۰۳) با استفاده از فنون سنجش‌ازدور و تصاویر ماهواره‌ای، وضعیت خشک‌سالی دشت قزوین را با شاخص‌هایی مانند TCI[1]، VCI[2] و VHI[3] بررسی کرده‌اند. آن‌ها نتایج را با شاخص SPI[4]مقایسه کرده و نشان داده‌اند که در بازه ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۹، نواحی شمال و شمال‌غرب دشت بارندگی مناسبی داشته‌اند، اما در دهه دوم (۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹) کاهش چشم‌گیر بارش و افزایش شدت خشک‌سالی رخ داده است. آن‌ها شدت خشک‌سالی را در ۶ کلاس طبقه‌بندی کرده و مساحت هر کلاس را در هر سال تعیین کرده‌اند. همچنین بررسی همبستگی بین شاخص‌ها نشان داده که شاخص PDSI[5] بالاترین همبستگی را با SPI دارد. از سال ۲۰۱۴ به بعد، نواحی شرق و جنوب‌شرقی دشت با افزایش روند خشک‌سالی مواجه شده و در سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ شدت خشک‌سالی به اوج رسیده است.

در مقیاس ملی و جهانی نیز بسیاری از آبخوان‌های واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک طی دهه‌های اخیر با بحران‌های فزاینده منابع آب زیرزمینی مواجه بوده‌اند. این بحران‌ها عمدتاً در قالب افت سطح ایستابی، افزایش شوری و کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی بروز یافته و پیامدهای قابل توجهی برای پایداری اکوسیستم‌ها، امنیت غذایی و معیشت جوامع محلی به همراه داشته‌اند (Famiglietti, 2014; Gleeson et al., 2012). پژوهش‌های متعددی نشان می‌دهند که رشد سریع شهرنشینی، تغییرات کاربری اراضی، برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی، نفوذ آلاینده‌ها و تداوم دوره‌های خشکسالی از مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده این بحران‌ها به شمار می‌روند (Taylor et al., 2013; Wada et al., 2010).

با وجود مطالعات متعدد درباره تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی، بسیاری از پژوهش‌ها این دو مؤلفه را به‌صورت جداگانه بررسی کرده‌اند و نقش ساختارهای مدیریتی و حکمرانی آب در تبیین این تغییرات کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ازاین‌رو، استفاده از رویکردهای تلفیقی که بتوانند به‌طور هم‌زمان ابعاد هیدروژئولوژیکی، تغییرات کاربری اراضی و سازوکارهای مدیریتی را در تحلیل وضعیت آبخوان‌ها در نظر بگیرند، برای درک بهتر پویایی منابع آب زیرزمینی و ارائه راهکارهای مدیریتی پایدار ضروری به نظر می‌رسد.

فعالیت‌های کشاورزی در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، از جمله نواحی مدیترانه‌ای، با فرسایش خاک، افت حاصل‌خیزی و کاهش کیفیت منابع آب همراه بوده است (Zalidis et al., 2002; Moghaddam et al., 2026; Suciu et al., 2020؛ مقدم، ۱۴۰۳). تغییرات کاربری اراضی نیز از طریق تغییر الگوی نفوذ، تبخیر–تعرق و رواناب، آثار قابل توجهی بر تغذیه و تخلیه آبخوان‌ها داشته است؛ به‌گونه‌ای که توسعه اراضی شهری معمولاً موجب کاهش تغذیه آبخوان و تشدید افت سطح آب شده است (Choi et al., 2012; Dong et al., 2016). در مقابل، توسعه کشاورزی و استقرار سکونت‌گاه‌ها نیز از عوامل اصلی افت کیفیت آب زیرزمینی شناخته شده‌اند (Zeynali et al., 2015; Clemens et al., 2020).

مطالعات اخیر مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای GRACE[6] نشان داده‌اند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ذخیره آب زیرزمینی طی دو دهه اخیر با روندی کاهشی همراه بوده و این کاهش در بسیاری از آبخوان‌ها با افت شدید تراز آب و تشدید ناپایداری هیدروژئولوژیک هم‌زمان بوده است (Chen et al., 2016; Bozorg-Haddad et al., 2026; Wang et al., 2019; Ramillien et al; 2008; Tapley et al., 2023). همچنین پژوهش‌های جدیدتر نشان می‌دهند که همبستگی داده‌های GRACE با اندازه‌گیری‌های زمینی در مقیاس‌های فصلی نسبت به مقیاس‌های ماهانه پایدارتر و قابل اعتمادتر است (Li et al., 2021؛ توانا و همکاران،۱۴۰۴). این نکته اهمیت تحلیل تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در بازه‌های زمانی میان‌مدت را برجسته می‌کند. از سوی دیگر، نتایج مدل‌سازی‌های هیدروژئولوژیکی نشان داده‌اند که نوع پوشش زمین نقش تعیین‌کننده‌ای در تغذیه آبخوان‌ها دارد؛ به‌طوری‌که مناطق جنگلی معمولاً نفوذ و تغذیه بالاتری نسبت به اراضی زراعی و مناطق تحت ساخت و ساز انسانی ثبت می‌کنند (Tam et al., 2018). در ایران نیز توسعه شتابان صنعتی، کشاورزی و مسکونی سبب افزایش EC و TDS و افت کیفیت آب زیرزمینی شده است (Yazdanpanahi et al., 2018). تغییرات کاربری اراضی طی دو دهه اخیر در بسیاری از

۱- شاخص ترکیبی بارش
۲- شاخص پوشش گیاهی
۳- شاخص سلامت گیاهی
۴- شاخص بارش استاندارد

5- Palmer Drought Severity Index

6- Gravity Recovery and Climate Experiment

دشت‌های کشور شامل گسترش اراضی زراعی و مسکونی و کاهش وسعت مراتع بوده است (Rezaei et al., 2021) که پیامدهای قابل توجهی بر تعادل آبخوان‌ها داشته است.

مجموع این شواهد نشان می‌دهد که بررسی هم‌زمان سه مؤلفه تراز آب زیرزمینی، کیفیت آب و تغییرات کاربری اراضی می‌تواند الگوهای پویای تأثیرگذاری متقابل این عوامل را آشکار کرده و زمینه تحلیل دقیق‌تر روندهای بلندمدت را فراهم سازد. در این راستا، پژوهش حاضر با تمرکز بر دو دشت قزوین و تایباد، به تحلیل تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی طی دوره‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ برای قزوین و ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۱ برای تایباد می‌پردازد. برای این منظور، داده‌های چاه‌های منتخب گردآوری شده و با بهره‌گیری از داده‌های آماری، مکانی و ماهواره‌ای، روندهای بلندمدت افت سطح آب، تغییرات شوری و الگوهای فضایی–زمانی کیفیت آب مورد تحلیل قرار می‌گیرد. افزون بر این، از آنجا که دشت تایباد با برداشت‌های غیرمجاز گسترده از سمت دیگر مرز و محدودیت‌های مرزی و همچنین مهاجرت مواجه است و دشت قزوین با افزایش برداشت آب زیرزمینی ناشی از فشار تامین نیاز غذایی کشور مواجه است، لذا تحلیل ساختارهای مدیریتی و شیوه‌های حکمرانی منابع آب نیز در تکمیل فهم هیدروژئولوژیک منطقه باید مدنظر قرار گرفته تا تصویری جامع و چندبعدی از وضعیت آبخوان‌ها ارائه شود و ضرورت بازنگری در سیاست‌گذاری منابع آب تبیین گردد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی، داده‌های هیدروژئولوژیک مربوط به چاه‌های پیزومتری منتخب از منابع رسمی مدیریت منابع آب گردآوری شد. در این پژوهش داده‌های تراز سالانه سطح آب زیرزمینی و هدایت الکتریکی آب(EC) مربوط به ۳۵ حلقه‌چاه در استان قزوین در محدوده آبخوان مرکزی دشت قزوین طی دوره زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ و همینطور۱۶ حلقه‌چاه در استان خراسان رضوی، در محدوده دشت تایباد، طی دوره ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۱ مورد استفاده قرار گرفت. مختصات مکانی چاه‌ها در سیستم UTM ثبت و برای تحلیل‌های مکانی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) به کار گرفته شد.

برای تحلیل الگوهای مکانی تغییرات سطح آب زیرزمینی و کیفیت آب، داده‌های نقطه‌ای چاه‌ها در محیط GIS پردازش و نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه گردید. به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین روش درون‌یابی، دو روش متداول وزن‌دهی معکوس فاصله[1] و کریجینگ[2] مورد آزمون قرار گرفت. دقت هر یک از روش‌ها با استفاده از شاخص ریشه میانگین مربعات خطا[3] و از طریق مقایسه مقادیر برآوردشده با داده‌های واقعی اندازه‌گیری‌شده در چاه‌ها ارزیابی شد. نتایج این ارزیابی نشان داد که روش کریجینگ دارای کم‌ترین مقدار RMSE بوده و از دقت بالاتری در بازنمایی تغییرات مکانی داده‌ها برخوردار است؛ ازاین‌رو این روش برای تهیه نقشه‌های نهایی پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی و هدایت الکتریکی آب انتخاب شد. به‌منظور بررسی نقش تغییرات کاربری اراضی در تحولات منابع آب زیرزمینی، نقشه کاربری اراضی سال ۱۴۰۲ به همراه داده‌های مکانی استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای و لایه‌های اطلاعات مکانی موجود در محیط GIS مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها امکان تحلیل الگوهای فضایی تغییرات کاربری زمین و مقایسه آن با روندهای زمانی تغییرات سطح آب زیرزمینی و شوری آب را فراهم ساخت.

در نهایت، با تلفیق داده‌های هیدروژئولوژیک چاه‌ها، نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از درون‌یابی مکانی و اطلاعات مربوط به کاربری اراضی، روندهای زمانی و الگوهای فضایی تغییرات منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه تحلیل شد. این رویکرد تلفیقی امکان بررسی هم‌زمان تغییرات تراز آب زیرزمینی، وضعیت کیفیت آب و تحولات کاربری اراضی را فراهم کرده و به درک دقیق‌تر روابط میان این عوامل در پویایی آبخوان‌های منطقه کمک می‌کند.

منطقه مطالعاتی

دشت قزوین در محدوده‌ای بین عرض‌های ۳۵ تا ۳۶/۳۱ درجه شمالی و طول‌های ۴۹/۴۰ تا ۵۰/۴۰ درجه شرقی واقع شده و یکی از مهم‌ترین مناطق راهبردی کشور از نظر کشاورزی، صنعتی و جمعیتی به شمار می‌رود. این دشت با وسعت قابل توجه، در بخش جنوبی البرز مرکزی قرار گرفته و از شمال به رشته‌کوه البرز، از جنوب به ارتفاعات آوج و بویین‌زهرا و از شرق به دشت‌های تاکستان محدود می‌شود. میانگین ارتفاع آن حدود ۱۲۰۰ متر از سطح دریا است و اقلیم نیمه‌خشک تا خشک با میانگین بارندگی سالانه حدود ۲۵۰ میلی‌متر دارد. وجود کمربندهای کوهستانی پیرامونی، باعث تمرکز رواناب‌های فصلی و در نتیجه اهمیت بالای آبخوان‌های زیرسطحی در پشتیبانی از فعالیت‌های اقتصادی منطقه شده است. تنوع کاربری اراضی، شامل اراضی زراعی مکانیزه، نواحی صنعتی، محدوده‌های شهری پرجمعیت و باغات حاشیه‌ای و فشارهای ترکیبی انسانی و طبیعی، این منطقه را به یکی از کانون‌های بحرانی منابع آب زیرزمینی کشور تبدیل کرده است (Moghaddam et al., 2025؛ مقدم و خلقی، ۱۴۰۴).

بهره‌برداری فشرده از منابع آب برای تولید محصولات آبی‌بر نظیر ذرت و یونجه، افت شدید تراز آبخوان، افزایش شوری و فرونشست زمین را در پی داشته است. این عوامل، دشت قزوین را به نمونه‌ای

1- Inverse Distance Weighting - IDW
2- Kriging
3- Root Mean Square Error - RMSE

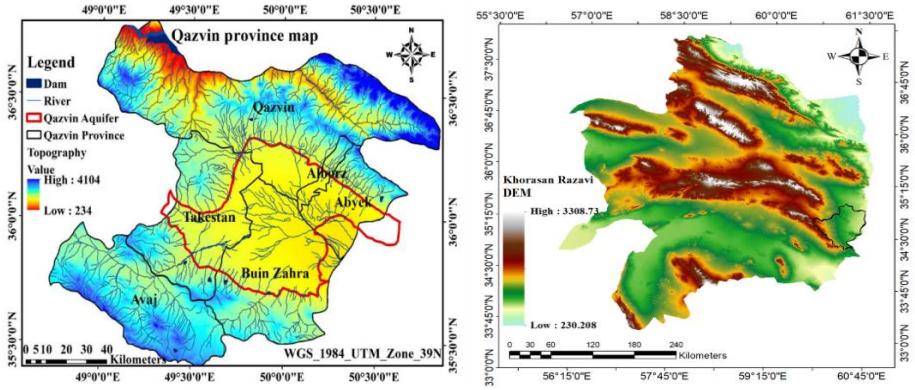
شاخص از بحران حکمرانی آب در مناطق مرکزی ایران تبدیل کرده است.

دشت تایباد نیز از پهنه‌های مهم شرق ایران در استان خراسان رضوی است که در مجاورت مرز ایران و افغانستان قرار دارد و از نظر اقلیمی، اقتصادی و امنیتی جایگاه ویژه‌ای دارد. این دشت در ناحیه‌ای نسبتاً هموار و خشک گسترش یافته و هسته اصلی آن پیرامون شهر تایباد با مختصات جغرافیایی تقریبی °۳۴/۴۴ عرض شمالی و °۶۰/۴۶ طول شرقی واقع است.

اقلیم آن خشک قاره‌ای با میانگین بارندگی کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر در سال، تبخیر سالانه بیش از ۲۵۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای حدود ۱۹ درجه سانتی‌گراد تعریف می‌شود. وسعت شهرستان تایباد حدود ۲۹۰۰ کیلومتر مربع است، اما گستره دشت به‌عنوان یک واحد هیدرولوژیک، تنها بخش‌های جنوبی و مرکزی شهرستان را شامل می‌شود؛ جایی که آبخوان‌های فعال و اراضی حاصل‌خیز آبرفتی توسعه یافته‌اند. ساختار اقتصادی منطقه به‌شدت به منابع آب زیرزمینی وابسته است و بالغ بر ۹۰ درصد آب مورد نیاز کشاورزی و شرب از چاه‌ها تأمین می‌شود. در نتیجه، دشت تایباد به‌دلیل ترکیب شرایط خشک اقلیمی، وابستگی شدید به آب زیرزمینی، موقعیت مرزی و محدودیت مدیریتی بین‌استانی و بین‌مرزی، به یکی از نمونه‌های برجسته برای تحلیل پویایی منابع آب و حکمرانی چندسطحی در مناطق مرزی کشور تبدیل شده است(آزادگان و همکاران، ۱۴۰۳؛ جانباز فوتمی و همکاران، ۱۴۰۲).



شکل۱- نقشه استان قزوین و خراسان‌رضوی در ایران



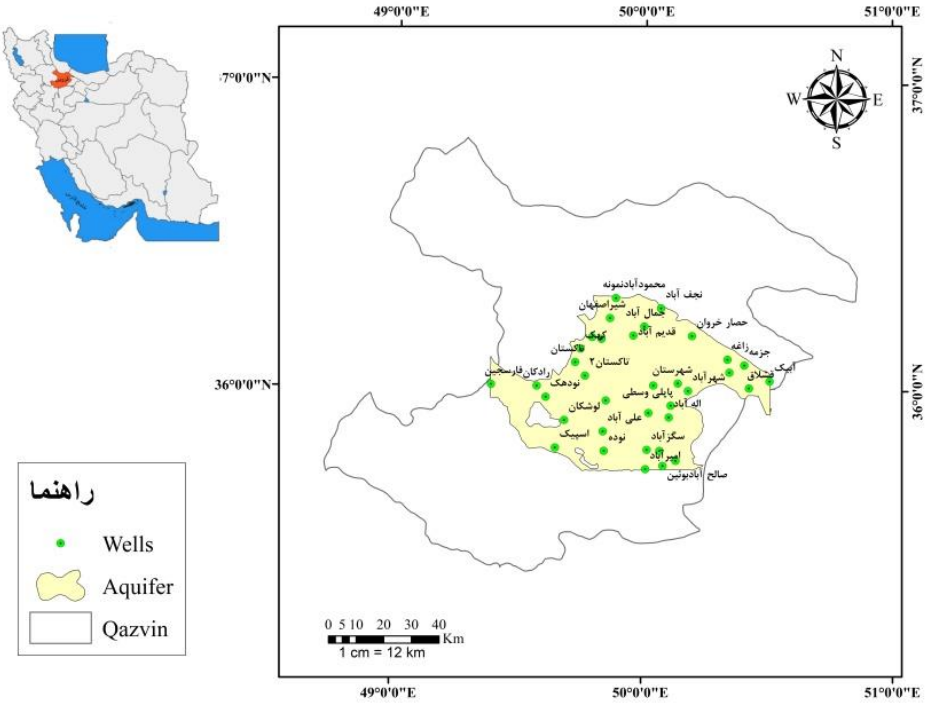
شکل۲- نقشه توپوگرافی استان خراسان‌رضوی(سمت راست) و قزوین(سمت چپ) و آبخوان‌های مورد بررسی

داده‌های مورد استفاده

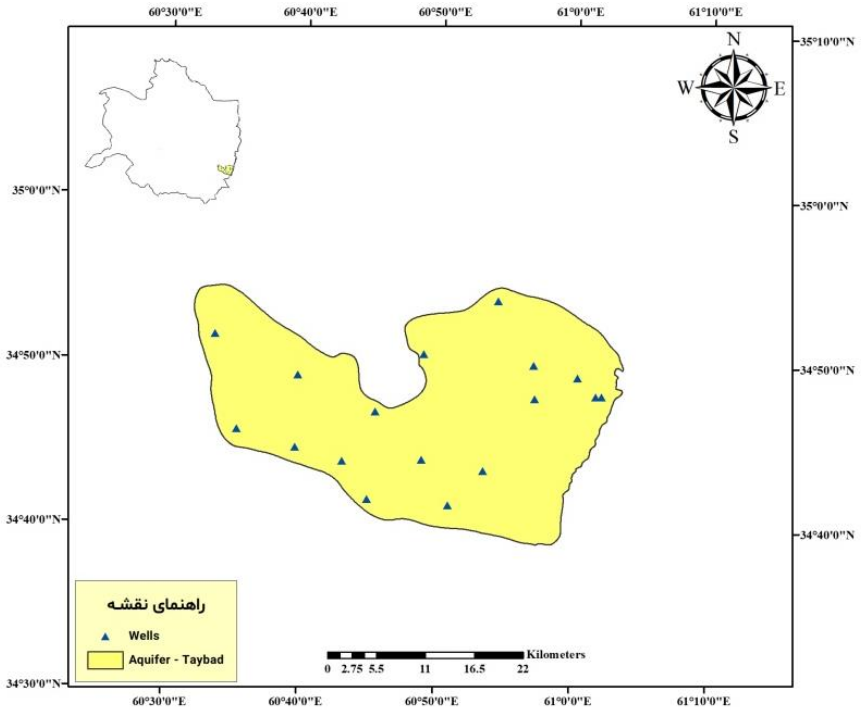
در این پژوهش، به‌منظور بررسی هم‌زمان تغییرات شوری و سطح آب زیرزمینی، ۳۵ حلقه چاه منتخب در دشت قزوین و۱۶ حلقه‌چاه منتخب دشت تایباد مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور، از داده‌های اندازه‌گیری‌شده هدایت الکتریکی (EC) و تراز سطح آب زیرزمینی (H) در دو مقطع زمانی ۱۳۸۰ و ۱۴۰۲برای قزوین و ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۱ برای تایباد استفاده شد. اطلاعات جمع‌آوری‌شده شامل مقادیر EC و H در طول دوره، به‌همراه مختصات مکانی چاه‌ها در سیستم مختصات جهانی (UTM)، بوده که از ایستگاه‌های مختلف برداشت گردیده است. همچنین، نقشه

کاربری اراضی مربوط به سال ۱۴۰۲ استان قزوین و ۱۴۰۱ استان خراسان‌رضوی نیز به‌منظور تحلیل فضایی و ارزیابی اثرات کاربری زمین بر منابع آب، در فرایند تحلیل با کمک جی آی اس وارد شد.

در این پژوهش، برای تحلیل، بررسی و مرتب‌سازی داده‌ها از نرم‌افزارهای Microsoft Excel، ArcGIS و Grapher استفاده‌شد.



شکل ۳-الف- نام محل و موقعیت مکانی چاه‌های اندازه‌گیری آبخوان قزوین

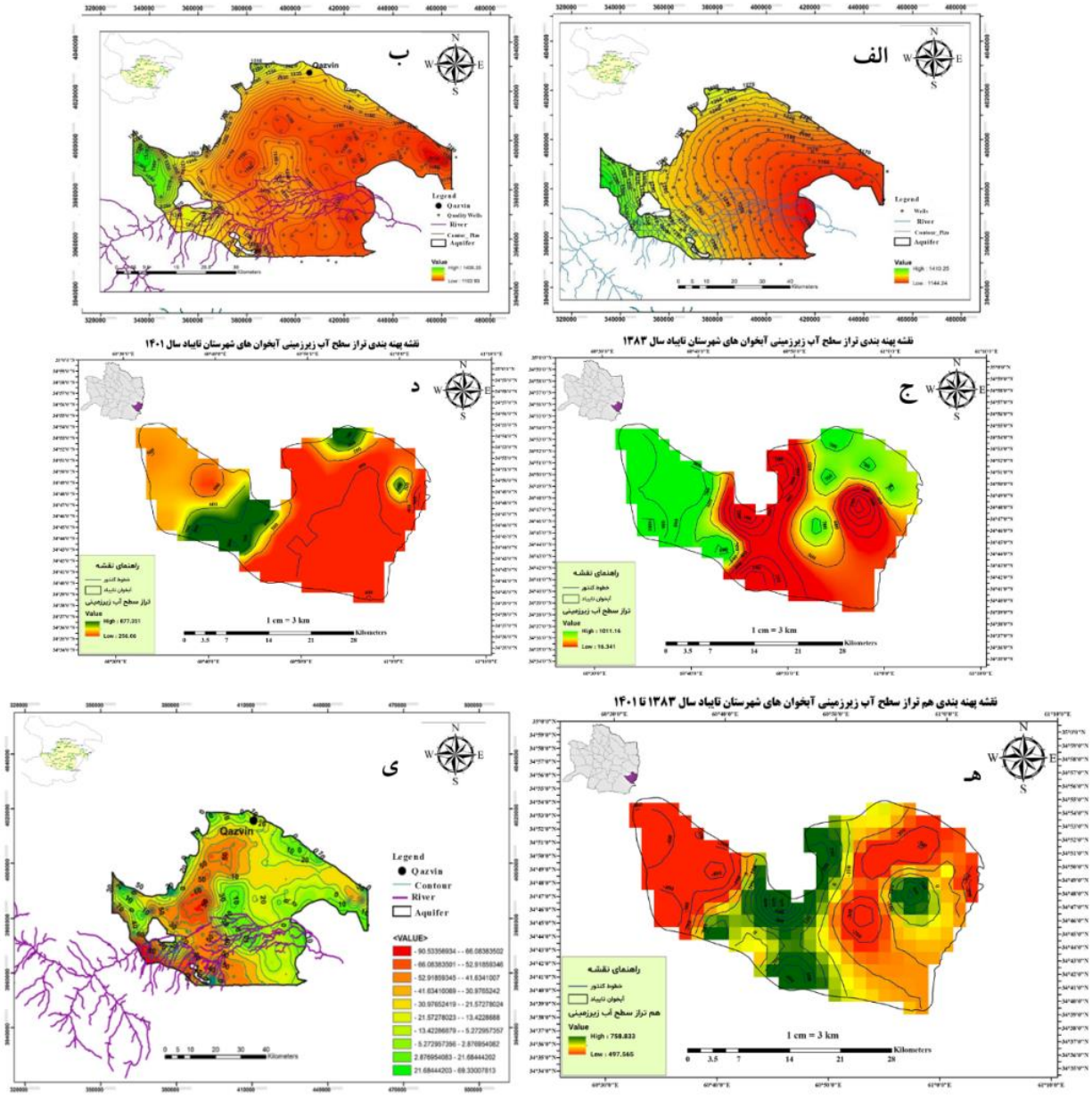


شکل ۳-ب- نام محل و موقعیت مکانی چاه‌های اندازه‌گیری آبخوان تایباد

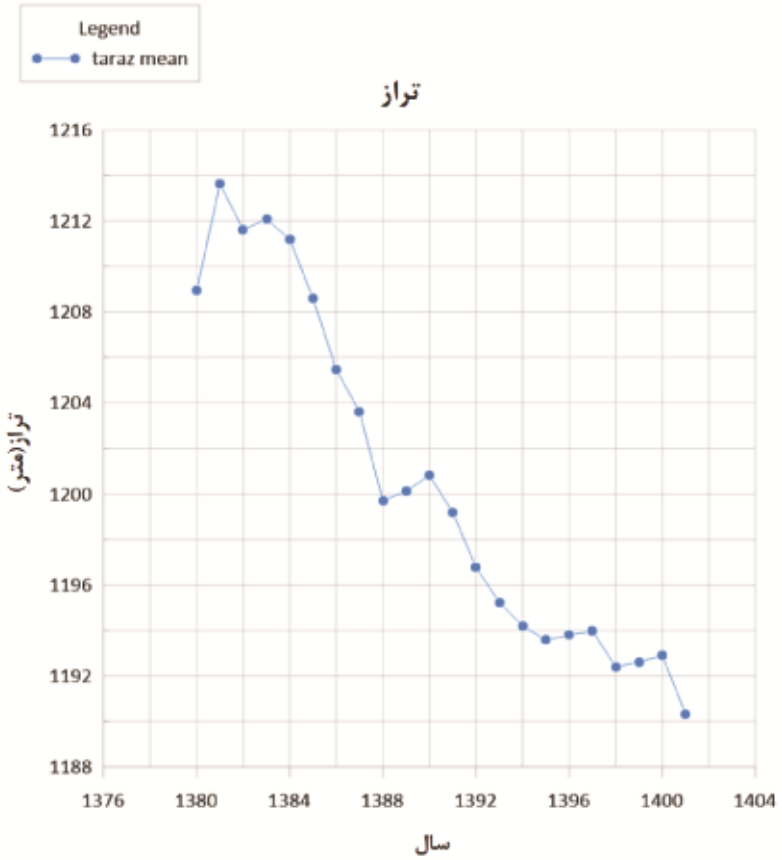
نتایج و بحث

بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی

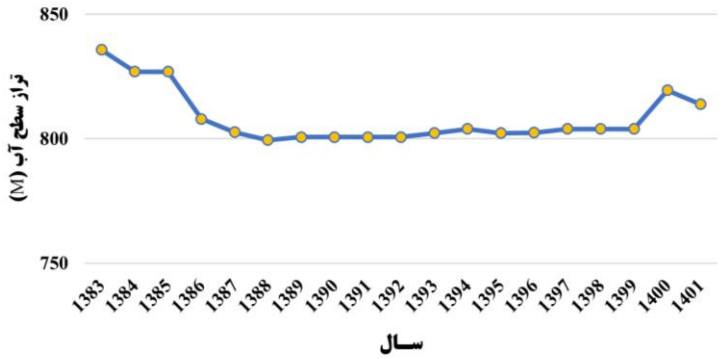
برای این‌کار ابتدا به پهنه‌بندی ابتدای دوره و انتهای دوره یعنی به ترتیب سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۴۰۲ بوسیله نرم‌افزار ArcMap پرداخته و با روش کریجینگ، پهنه بندی تراز آب زیرزمینی برای هرسال را به صورت جداگانه محاسبه کرده وسپس با ابزار رستر Calculator در Arc Map اختلاف پهنه بندی‌ها را محاسبه و بدست آوردیم. شکل(۴-الف) تا شکل (۴-د)، ملاحظه می‌شود که در طی ۲۲ سال بررسی در این پژوهش بیش‌ترین افت تراز آب زیرزمینی در مناطق دارای زراعت رخ داده است.



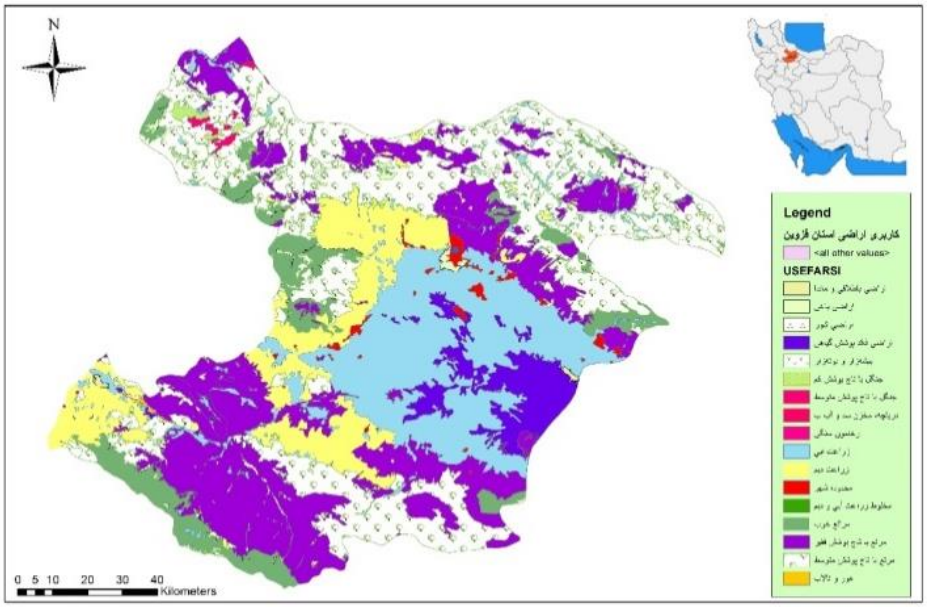
شکل ٤- الف- نقشه پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی قزوین سال ۱۳۸۰-ب- قزوین سال ۱۴۰۲-ج- نقشه پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی تایباد سال ۱۳۸۳ - د- تایباد سال ۱۴۰۱ تایباد-هـ-نقشه هم افت و هم خیز ترازسطح آب زیرزمینی آبخوان تایباد(۱۳۸۳-۱۴۰۱) - ی- نقشه هم‌افت و خیز تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت قزوین (۱۳۸۰-۱۴۰۲)



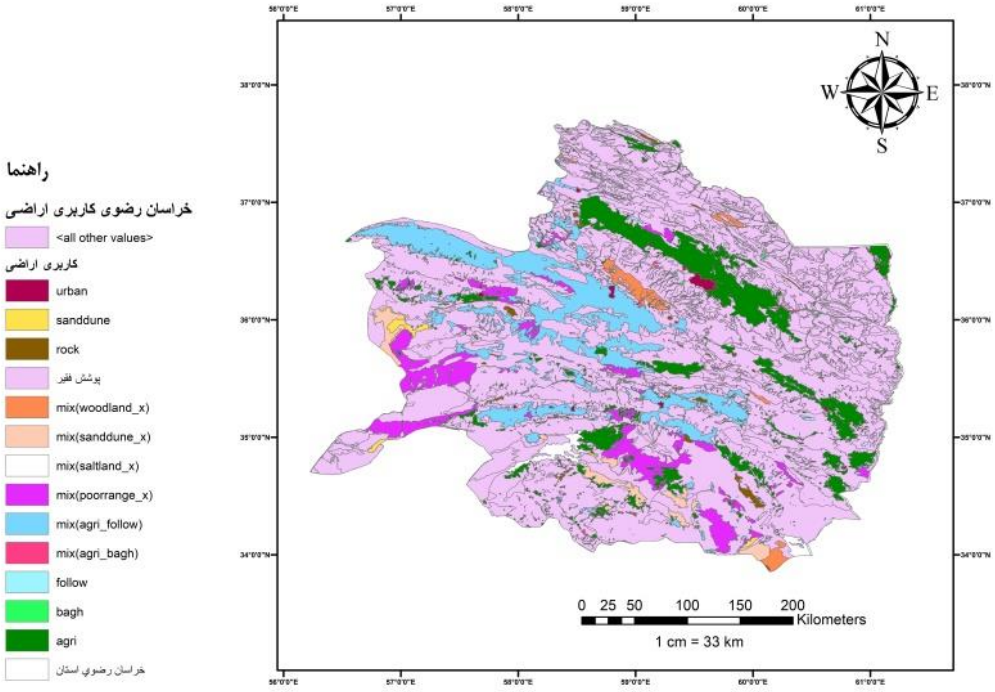
شکل ٤-ج- نمودار تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی دوره مطالعاتی- دشت قزوین(۱٤۰۱ -۱۳۸۰)



شکل ٤-د- نمودار تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی دوره مطالعاتی- تایباد(۱٤۰۱-۱۳۸۳).



شکل۵-الف- نقشه کاربری اراضی استان قزوین(شرکت آب منطقه‌ای قزوین، ۱۴۰۲)



شکل۵-ب- نقشه کاربری اراضی خراسان‌رضوی(شرکت آب منطقه‌ای خراسان‌رضوی، ۱۴۰۱)

بررسی روند زمانی تراز آب زیرزمینی در دو دشت قزوین و تایباد نشان می‌دهد که هر دو آبخوان طی دو دهه گذشته با کاهش قابل‌توجه تراز مواجه بوده‌اند، با این حال الگوی زمانی و فضایی افت در آن‌ها متفاوت است. در دشت قزوین، تراز آب زیرزمینی طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ روندی نزولی و پیوسته داشته است. بیشترین شیب افت مربوط به دوره‌های ۱۳۸۲–۱۳۸۵ و ۱۳۸۵–۱۳۸۹ بوده و از سال ۱۳۸۹ به بعد نیز همزمان با تشدید خشکسالی‌های اقلیمی، این روند تداوم یافته است. بیشترین میزان افت در بخش‌های مرکزی و شمالی دشت مشاهده می‌شود که با تمرکز اراضی کشاورزی و تراکم جمعیتی همپوشانی دارد. این هم‌پوشانی نشان می‌دهد که

برداشت‌های گسترده از منابع آب زیرزمینی و توسعه ناموزن کشاورزی از عوامل اصلی افت ساختاری آبخوان در این منطقه هستند. بر اساس گزارش شرکت آب منطقه‌ای قزوین، در برخی زیرحوضه‌ها سهم منابع آب زیرزمینی از کل مصرف آب در بخش کشاورزی به حدود ۸۰ درصد می‌رسد، در حالی‌که میانگین کل دشت حدود ۴۵ درصد برآورد شده است (شرکت آب منطقه‌ای قزوین، ۱۴۰۰). توسعه بی‌رویه اراضی کشاورزی، تبدیل اراضی طبیعی به اراضی زراعی در اثر افزایش جمعیت و نیاز غذایی، و برداشت‌های متمرکز از چاه‌ها از مهم‌ترین عوامل تشدید افت تراز آب زیرزمینی در این منطقه محسوب می‌شوند. علاوه بر این، خشکسالی نیز نقش مهمی در تشدید این روند داشته است؛ به‌طوری که کاهش بارندگی و افزایش دما موجب افزایش وابستگی به منابع آب زیرزمینی و در نتیجه افت تراز آبخوان شده است. در نواحی نزدیک به مناطق شهری، اگرچه میزان افت نسبت به مناطق زراعی کمتر است، اما به دلیل افزایش جمعیت و گسترش باغات در اطراف شهر قزوین، همچنان کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در تراز آب زیرزمینی مشاهده می‌شود. همچنین نتایج این پژوهش و بررسی‌های رضایی و همکاران (۱۴۰۰) نشان می‌دهد که طی سال‌های اخیر مساحت اراضی زراعی، شهری و شوره‌زارها افزایش یافته، در حالی که روند تغییرات مراتع کاهشی بوده است.

در مقابل، دشت تایباد در شرق کشور با وجود وسعت کمتر و شرایط اقلیمی خشک‌تر، الگوی افت متفاوتی را تجربه کرده است. بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی نشان می‌دهد که این آبخوان طی سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۶ با یک افت بسیار شدید اولیه (حدود ۴۰ متر) مواجه شده و پس از آن طی یک دوره نسبتاً طولانی در سطحی پایین‌تر به حالت شبه‌پایدار رسیده است. از سال ۱۳۹۷ به بعد نشانه‌هایی از بازیابی محدود مشاهده می‌شود، اما تراز آب زیرزمینی هرگز به شرایط پیش از افت اولیه بازنگشته است.

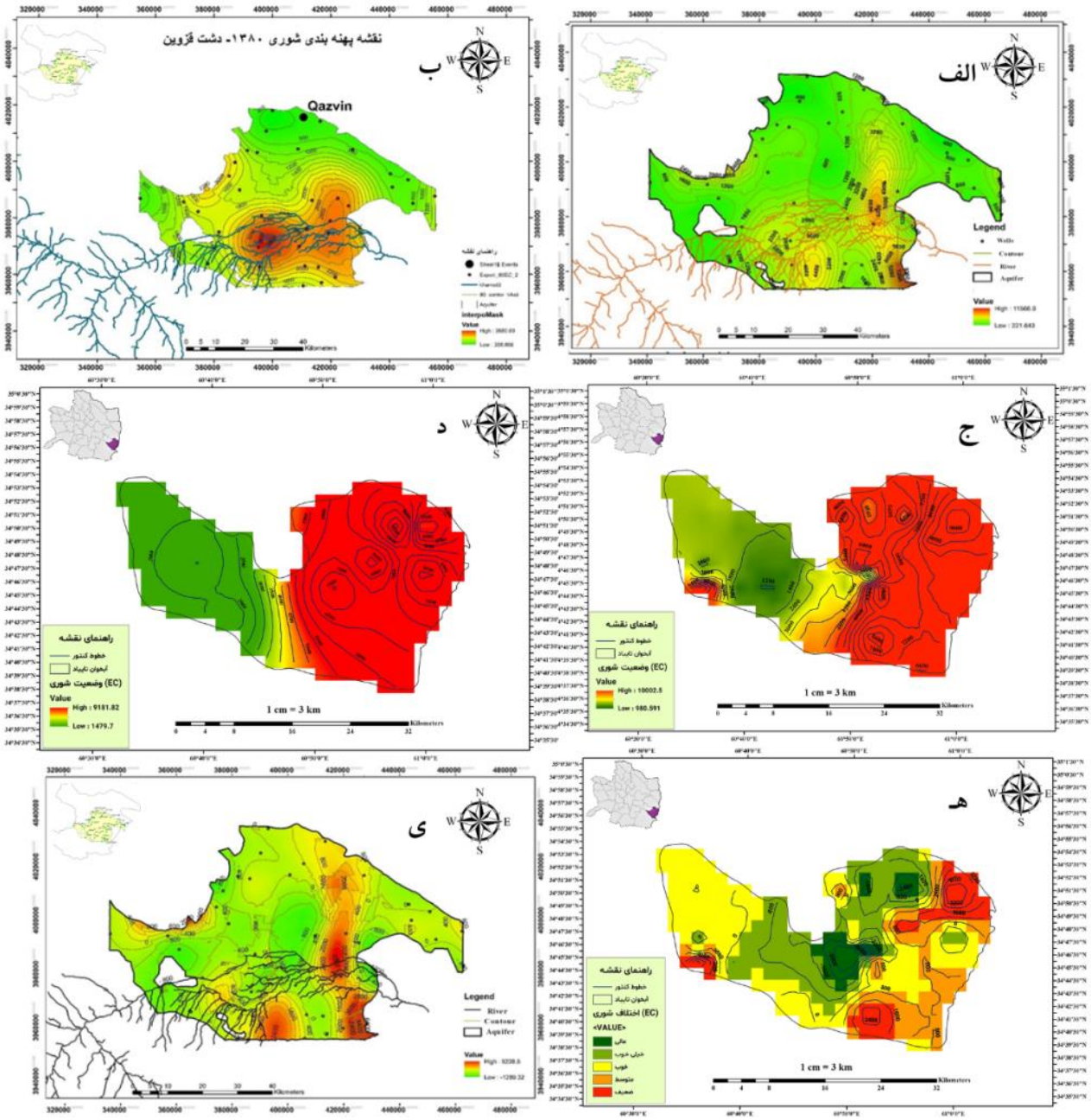
تحلیل نقشه‌های پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی مربوط به سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۴۰۱ که با روش کریجینگ تهیه و با استفاده از ابزار Raster Calculator مقایسه شده‌اند، نشان می‌دهد که افت آبخوان تایباد دارای ماهیتی فضایی–موضعی و بسیار شدید است. منظور از ماهیت فضایی–موضعی این است که کاهش تراز آب زیرزمینی در سراسر دشت به‌طور یکنواخت رخ نداده، بلکه به‌صورت متمرکز در برخی پهنه‌های خاص ظاهر شده است؛ به‌گونه‌ای که در بخش‌هایی از آبخوان افت بسیار شدید و در بخش‌های دیگر تغییرات محدود مشاهده می‌شود. بیشترین افت در بخش‌های شرقی آبخوان، به‌ویژه نواحی نزدیک به مرز افغانستان رخ داده است. این مناطق در نقشه کاربری اراضی عمدتاً با پوشش فقیر مشخص شده‌اند و در میان آن‌ها لکه‌هایی از اراضی باغی نیز مشاهده می‌شود. این هم‌پوشانی نشان می‌دهد که افت شدید تراز آب زیرزمینی عمدتاً در مناطقی رخ داده که هم از نظر توان اکولوژیک ظرفیت پایینی دارند و هم مصرف آب در آن‌ها به دلیل وجود باغات و اراضی کشاورزی نسبتاً بالا است(Mishra et al.,2015).

به‌طور کلی، الگوی افت در دشت تایباد شدید، متمرکز و جهت‌دار است و بیشترین کاهش تراز در پهنه‌هایی مشاهده می‌شود که ترکیبی از پوشش گیاهی فقیر و کاربری‌های پرمصرف آب را در بر می‌گیرند؛ وضعیتی که نقش کاربری اراضی و تمرکز برداشت در تشدید افت آبخوان را به‌خوبی نشان می‌دهد. در مجموع، دشت قزوین نمونه‌ای از یک آبخوان با افت تدریجی، گسترده و وابسته به فشارهای بلندمدت اقلیمی و توسعه کشاورزی است، در حالی که دشت تایباد نمونه‌ای از یک آبخوان با افت شدید، موضعی و وابسته به ساختار فضایی کاربری اراضی و تمرکز برداشت در پهنه‌های کم‌ظرفیت محسوب می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افت آبخوان قزوین بیشتر تحت تأثیر روندهای اقلیمی و بهره‌برداری بلندمدت قرار دارد، در حالی که در تایباد ساختار فضایی کاربری اراضی و تمرکز برداشت در نواحی شرقی نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری افت شدید و موضعی آب زیرزمینی داشته است (مقدم و خلقی، ۱۴۰۴).

بررسی تغییرات هدایت الکتریکی آب زیرزمینی

برای بررسی ارتباط میان تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی، روند تغییرات هدایت الکتریکی (EC) هم‌زمان با نوسانات تراز سطح ایستابی مورد تحلیل قرار گرفت. هدایت الکتریکی به‌عنوان شاخصی از میزان املاح محلول در آب زیرزمینی در نظر گرفته شد و تغییرات آن در کنار افت یا افزایش سطح آب زیرزمینی تفسیر گردید. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، افت سطح ایستابی معمولاً با افزایش غلظت املاح همراه است، زیرا کاهش تغذیه طبیعی و افزایش برداشت می‌تواند موجب کاهش فرآیند رقیق‌سازی و در نتیجه افزایش شوری آب زیرزمینی شود (Custodio, 2010; Domenico & Schwartz, 1998).

بر این اساس، تغییرات زمانی تراز آب زیرزمینی و EC در طول دوره مطالعه به‌طور هم‌زمان بررسی شد تا رابطه احتمالی میان افت سطح آب و افزایش شوری مشخص گردد. همچنین تحلیل مکانی داده‌ها در نقاط مختلف دشت امکان بررسی تفاوت‌های فضایی در رفتار کیفی آب زیرزمینی را فراهم کرد و نشان داد که این تغییرات می‌تواند تحت تأثیر شدت برداشت آب و نوع کاربری اراضی در بخش‌های مختلف دشت قرار گیرد.



شکل ٦-الف) نقشه پهنه‌بندی هدایت الکتریکی (شوری) آب زیرزمینی قزوین در دوره ۱۴۰۲ ب) قزوین دوره ۱۳۸۰ ج) پهنه‌بندی شوری سال ۱۴۰۱ تایباد د) پهنه‌بندی شوری سال ۱۳۸۳ تایباد هـ) هم‌شوری تایباد ی) هم شوری قزوین

تحلیل تغییرات شوری و کاربری اراضی در دو دشت قزوین و تایباد طی دو دهه اخیر نشان می‌دهد که هر دو آبخوان با افزایش شوری مواجه شده‌اند، اما ماهیت و محرک‌های این افزایش در هر دشت متفاوت است. در دشت قزوین، افزایش شوری عمدتاً تحت تأثیر کاهش تغذیه آبخوان ناشی از افت بارندگی، افزایش تبخیر و تغییرات اقلیم بوده است. توسعه شهرنشینی، نفوذ تدریجی فاضلاب‌های خانگی و صنعتی، برداشت بیش از ظرفیت، و استفاده مداوم از کودها و سموم شیمیایی در اراضی کشاورزی نیز نقش تشدیدکننده داشته‌اند. در جنوب دشت، نبود پوشش گیاهی مؤثر و تبخیر بالا موجب تمرکز بیشتر املاح شده است(Zalidis et al., 2002) . داده‌های هدایت الکتریکی چاه‌های پایش طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ و نقشه‌های تغییرات شوری (شکل ۶) این روند را تأیید می‌کنند.

در دشت تایباد، بیش‌ترین افزایش شوری در بخش شرقی آبخوان مشاهده می‌شود؛ ناحیه‌ای که در مجاورت مرز افغانستان قرار دارد.

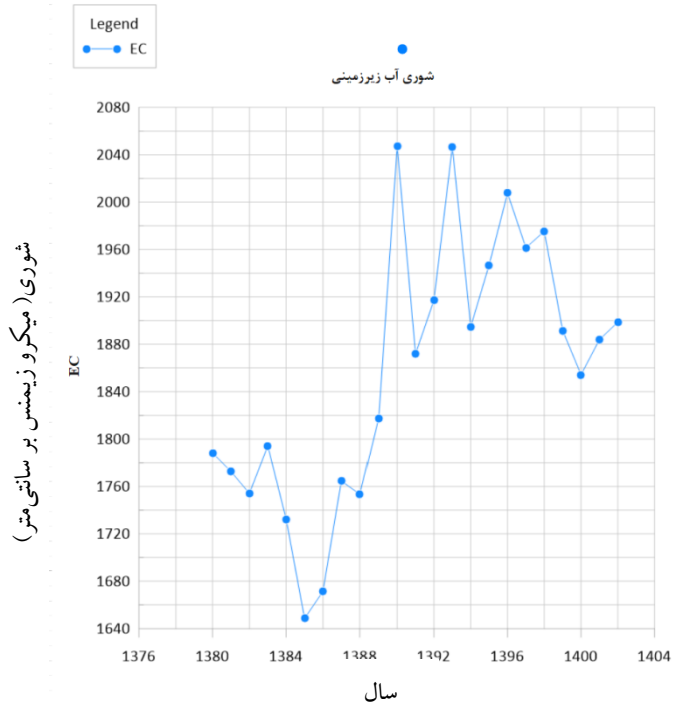
بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی هدایت الکتریکی و روند زمانی داده‌های EC طی دوره ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ نشان می‌دهد که افزایش شوری به‌صورت متمرکز در این بخش از آبخوان رخ داده است. این الگو را می‌توان با چند عامل هیدروژئولوژیکی توضیح داد. نخست، شرایط اقلیمی بسیار خشک منطقه که با کاهش بارندگی و افزایش تبخیر همراه است، موجب کاهش تغذیه طبیعی آبخوان و افزایش غلظت املاح در آب زیرزمینی می‌شود. دوم، ساختار هیدرودینامیکی آبخوان که دارای شیب هیدرولیکی به سمت شرق است، سبب می‌شود جریان آب زیرزمینی به سمت نواحی مرزی هدایت شود. در چنین شرایطی، برداشت‌های گسترده از چاه‌ها در بخش فرامرزی آبخوان در خاک افغانستان، که خارج از نظام مدیریت و پایش منابع آب ایران قرار دارد، می‌تواند موجب تشدید افت تراز و تمرکز املاح در این بخش از آبخوان شود.

در مقابل، الگوی افزایش شوری در دشت قزوین ماهیتی متفاوت دارد. در این دشت، افزایش هدایت الکتریکی بیش‌تر به‌صورت تدریجی و در مقیاس وسیع‌تری در سطح آبخوان مشاهده می‌شود و عمدتاً با توسعه گسترده فعالیت‌های کشاورزی، گسترش مناطق شهری و افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی در ارتباط است. در واقع، در حالی که در دشت قزوین افزایش شوری بیشتر ناشی از فشارهای گسترده بهره‌برداری و کاهش تدریجی تغذیه آبخوان است، در دشت تایباد افزایش شوری عمدتاً ماهیتی مکانی و متمرکز داشته و تحت تأثیر شرایط اقلیمی خشک، ساختار هیدرودینامیکی آبخوان و برداشت‌های فرامرزی قرار دارد.

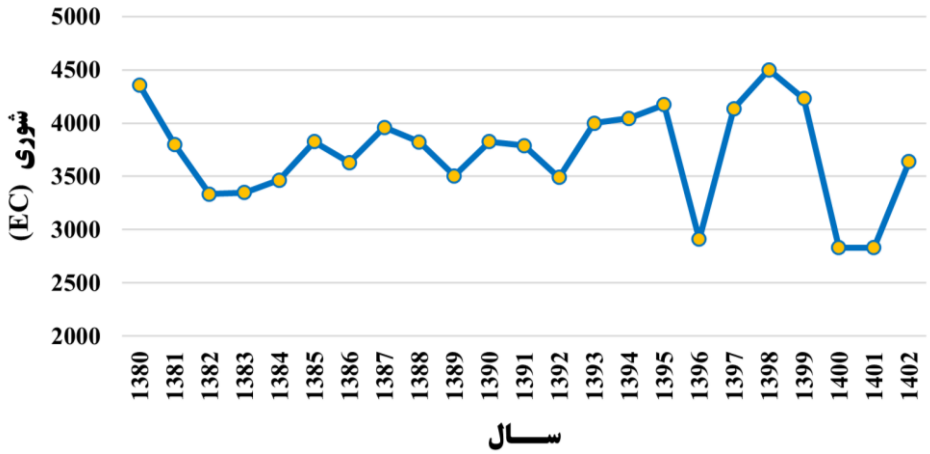
این تفاوت در الگوی شکل‌گیری شوری نشان می‌دهد که فرآیندهای کنترل‌کننده کیفیت آب زیرزمینی در دو دشت یکسان نیستند؛ به‌طوری‌که مدیریت منابع آب در دشت قزوین باید بر کنترل برداشت و مدیریت تقاضای آب در بخش کشاورزی و شهری متمرکز باشد، در حالی که در دشت تایباد علاوه بر مدیریت مصرف داخلی، توجه به شرایط هیدروژئولوژیکی مرزی و پایش تغییرات آبخوان در مقیاس منطقه‌ای نیز ضروری است.

تحلیل روند تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی

تحلیل تغییرات شوری و تراز آب زیرزمینی، با توجه به نکات پیچیده‌ای که در مسائل آب زیرزمینی وجود دارد، به درک عمیق از تأثیرات کشاورزی و رفتار زهاب‌های کشاورزی بر کیفیت آب کمک می‌کند. برای تحلیل این پدیده، ابتدا به توضیح چند مکانیسم مهم در ارتباط بین کاهش و افزایش تراز آب زیرزمینی و تغییرات شوری پرداخته و سپس تحلیل بازه به بازه را ارائه می‌کنیم. بررسی روند تغییرات شوری هم‌زمان با نوسانات تراز آب زیرزمینی در دشت قزوین، به‌ویژه در سال‌هایی که بارندگی افزایش یافته اما شوری نیز رشد کرده است، نشان‌دهنده وجود فرآیندهای پیچیده و چندعاملی در سیستم آبخوان است. در چنین مواردی، می‌توان دست‌کم دو تبیین علمی محتمل برای این پدیده در نظر گرفت.



شکل ۷- الف-روند تغییرات هدایت الکتریکی در ۱۳۸۰-۱۴۰۲- دشت قزوین



شکل ۷-ب- روند تغییرات هدایت الکتریکی در ۱۳۸۰-۱۴۰۲- دشت تایباد

یکی از سازوکارهای شناخته‌شده افزایش شوری آب زیرزمینی، آزادسازی و انتقال نمک‌های تجمع‌یافته در ناحیه غیراشباع[1] به آبخوان است. در شرایط اقلیم خشک و نیمه‌خشک، طی دوره‌های خشکسالی بلندمدت، به دلیل تبخیر شدید، صعود مویرگی آب از سطح ایستابی و کاهش تغذیه آبخوان، املاح محلول به‌تدریج در بخش‌های بالایی ناحیه غیراشباع تجمع می‌یابند. این املاح عمدتاً در افق‌های خاکی یا رسوبات سطحی به‌صورت نمک‌های محلول (مانند کلریدها و سولفات‌ها) انباشته می‌شوند و به‌صورت یک لایه زمین‌شناسی مشخص محسوب نمی‌شوند، بلکه حاصل فرآیندهای خاک‌زایی و تبخیری در ناحیه غیراشباع هستند.

در صورتی که پس از یک دوره خشکسالی، در یک دوره ترسالی سطح ایستابی افزایش یابد و برای نخستین بار طی سال‌های اخیر به این افق‌های غنی از نمک در ناحیه غیراشباع برسد، تماس آب زیرزمینی با این ذخایر نمکی می‌تواند موجب انحلال سریع آن‌ها و انتقال املاح به آبخوان شود. این پدیده که در ادبیات هیدروژئولوژی با عنوان «آزادسازی نمک‌های تجمع‌یافته در ناحیه غیراشباع» شناخته می‌شود، می‌تواند به افزایش موقتی شوری آب زیرزمینی منجر شود. وقوع چنین فرآیندی در مطالعات مختلف در مناطق خشک جهان از جمله در تگزاس و برخی مناطق ایران گزارش شده است (Scanlon et al., 2002; Jalali, 2007).

البته به دلیل نبود داده‌های شیمی خاک، فرآیند تحرک نمک‌ها به‌عنوان یک تبیین احتمالی مطرح می‌شود و نیازمند بررسی‌های تکمیلی است.

دوم، آنکه ، ممکن است افزایش شوری نه به‌واسطه تماس مستقیم سطح ایستابی با لایه‌های نمکی، بلکه در نتیجه شست‌وشوی این نمک‌ها در مسیر ورود آب از ناحیه غیراشباع به ناحیه اشباع رخ داده باشد. به بیان دیگر، آب نفوذی در مسیر خود از بالا به پایین، املاح تجمع‌یافته در خاک خشک را حل کرده و با خود به منطقه اشباع منتقل کرده باشد. این تبیین نیز در ادبیات هیدروژئوشیمی مناطق خشک پذیرفته شده و بر پایه اصول فرآیند انتقال جرم در سیستم‌های نفوذی قابل دفاع است (Scanlon et al., 2006; Custodio, 2010).

با توجه به اینکه فرآیندهای مذکور در ناحیه زیرسطحی رخ می‌دهند و در این مطالعه امکان انجام آنالیزهای ژئوشیمیایی، ردیابی ایزوتوپی یا نمونه‌برداری عمقی از خاک و آبخوان فراهم نبوده است، تشخیص قطعی منشأ افزایش شوری بدون آزمایشات میدانی ممکن نیست. با این حال، هر دو مکانیزم فوق، از نظر علمی معتبر بوده و می‌توانند به احتمال زیاد بسته به شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه، به‌طور مستقل یا توأمان در افزایش شوری ایفای نقش کرده باشند. همچنین شوری آب زیرزمینی در مناطق کشاورزی تحت تأثیر سه سازوکار عمده قرار می‌گیرد. نخست، نوسانات تراز آب زیرزمینی می‌تواند بر تماس آب با نمک‌های انباشته‌شده در ناحیه غیر اشباع اثر بگذارد؛ به‌طوری‌که در زمان کاهش تراز، تماس با این نمک‌ها کاهش یافته و شوری ممکن است افت کند، اما با افزایش سطح ایستابی، این نمک‌ها به آبخوان وارد شده و منجر به افزایش موقتی شوری می‌شوند (Scanlon et al., 2002; Scanlon et al., 2018). دوم، در پدیده‌ای موسوم به شورکشی، کاهش تراز موجب تبخیر بیشتر و انباشت نمک‌ها در لایه‌های سطحی خاک می‌شود؛ در چنین شرایطی، ظرفیت رقیق‌سازی آب کاهش یافته و غلظت نمک در محلول خاک افزایش می‌یابد. با این حال، اگر کاهش تراز ناشی از برداشت شدید آب زیرزمینی باشد، بخشی از نمک همراه با آب برداشت شده از آبخوان خارج می‌شود و افزایش شوری لزوماً رخ نمی‌دهد. این وضعیت بیش‌تر در آبخوان‌های نیمه‌محصور و مناطق خشک مشاهده می‌شود که به دلیل تبخیر سطحی زیاد، نمک‌ها در ناحیه غیر اشباع تجمع

1 Mobilization of Salts from the Unsaturated zone

یافته و با افزایش مجدد تراز، به آبخوان بازمی‌گردند، بنابراین افزایش موقتی و غیرخطی شوری به وجود می‌آید (Jalali, 2007; Rengasamy, 2006; Scanlon et al., 2002). همچنین اثر شورکشی عمدتاً در آبخوان‌های کم‌عمق با سطح ایستابی نزدیک به سطح زمین رخ می‌دهد و در آبخوان‌های عمیق‌تر (بیش از ۱۰۰ متر) این اثر ضعیف‌تر یا با تأخیر زمانی ظاهر می‌شود، هرچند در شرایط خاص امکان وقوع آن وجود دارد (Jalali, 2007; Scanlon et al., 2002). سوم، نفوذ زهاب‌های کشاورزی که حاوی نمک و کودهای شیمیایی هستند، از طریق آبیاری و زه‌آب‌های سطحی به لایه‌های زیرسطحی و در نهایت به آبخوان وارد می‌شوند و باعث افزایش تدریجی یا مزمن شوری آب زیرزمینی می‌گردند (Scanlon et al., 2007; Gabrabad et al., 2026; Suarez, 2001). شناخت همزمان این سه فرآیند برای تحلیل پویای کیفیت آب زیرزمینی در مناطق کشاورزی ضروری است.

دوره ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۴: درقزوین در این بازه، تراز آب زیرزمینی روندی کاهشی دارد و شوری نیز به تدریج کاهش می‌یابد. این وضعیت می‌تواند به کاهش تماس آب زیرزمینی با لایه‌های نمک‌دار و زهاب‌های کشاورزی اشاره داشته باشد. این دوره می‌تواند نشان‌دهنده کم شدن منابع آب و کاهش تماس با منابع نمکی انباشته در خاک باشد.

در تایباد در تایباد نیز طی این دوره تراز آب زیرزمینی از مقادیر بالاتر به‌تدریج کاهش می‌یابد، اما شوری در سطحی نسبتاً ثابت و متوسط باقی می‌ماند. آبخوان هنوز وارد فاز بحران نشده و نمک‌ها در ناحیه غیراشباع در حال تجمع اولیه‌اند. برخلاف قزوین که بارندگی نقش رقیق‌سازی دارد، در تایباد به‌دلیل اقلیم خشک‌تر و پوشش فقیر، شوری در همین دوره نیز نسبتاً بالاتر تثبیت می‌شود، اما هنوز جهش قابل‌توجهی رخ نمی‌دهد.

دوره ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹: درقزوین در این بازه زمانی، تراز آب زیرزمینی همچنان روند کاهشی دارد و شوری در ابتدا کاهش یافته و سپس به تدریج افزایش می‌یابد. این افزایش مجدد شوری می‌تواند ناشی از افزایش برداشت‌ها و کاهش بیش‌تر تراز باشد که منجر به شورکشی و افزایش غلظت نمک‌ها در آب زیرزمینی می‌شود. همچنین، فعالیت‌های کشاورزی در این دوره می‌توانند باعث افزایش شوری شوند.

در تایباد نیز همین بازه زمانی نقطه آغاز تغییرات کیفی محسوس است. چند سال افت تراز و خشکی باعث تجمع نمک در لایه‌های بالایی خاک شده و در سال‌های ۱۳۸۷–۱۳۸۸ یک جهش شوری رخ می‌دهد. این جهش ناشی از بارندگی نسبتاً بهتر در این سال‌هاست که نمک‌های ذخیره‌شده را شسته و وارد آبخوان کرده است. این همان مکانیسم Mobilization of Salts احتمالی است که در قزوین در سال ۱۳۹۰ رخ داد، اما در تایباد زودتر و با شدت بیش‌تری ظاهر شد. زهاب‌های کشاورزی تجمع‌یافته نیز در این دوره به آبخوان رسیده و پیک شوری را تشدید کرده‌اند. پیک شوری در سال ۱۳۹۰: در سال ۱۳۹۰، یک جهش قابل‌توجه در هدایت الکتریکی (EC) مشاهده می‌شود و مقدار آن به حدود ۲۰۴۷ µS/cm می‌رسد که بالاترین مقدار در بازه مورد مطالعه است. این پیک شوری می‌تواند با شروع دوره خشکسالی شدید در سال قبل (۱۳۸۹) مرتبط باشد. در سال‌های منتهی به این خشکسالی، برداشت‌های مداوم و بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی، همراه با تجمع املاح ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و ورود زهاب‌های حاوی کود و سموم در خاک‌های سطحی، موجب انباشت تدریجی نمک در ناحیه غیراشباع خاک شده است. اگرچه نفوذ این ترکیبات به منطقه اشباع در بازه‌های کوتاه‌مدت (کمتر از یک سال) به‌دلیل هدایت هیدرولیکی قائم پایین آبخوان، بسیار کند است، اما با کاهش تراز سطح ایستابی در نتیجه برداشت زیاد، تماس با لایه‌های نمک‌دار خاک تشدید شده و ظرفیت رقیق‌سازی کاهش می‌یابد. لذا در این مطالعه، فرض بر این است که افزایش شوری در سال ۱۳۹۰ می‌تواند نتیجه ترکیبی از عوامل زیر باشد: (۱) کاهش رقیق‌سازی آب در اثر برداشت، و (۲) تماس موضعی با لایه‌های شور حاصل از تجمع زهاب، بدون آن‌که لزوماً تمام ترکیبات زهاب به عمق آبخوان رسیده باشند. این تحلیل مبتنی بر هم‌زمانی پدیده‌هاست و نیازمند مدل‌سازی عددی دقیق‌تر در مطالعات آتی است (Custodio, 2010; Scanlon et al., 2002; Konikow & Kendy, 2005).

افزون بر این، افت تراز سطح ایستابی ناشی از برداشت بی‌رویه می‌تواند موجب جابجایی آب شور از نواحی جانبی یا از لایه‌های پایین‌تر به سمت ناحیه اشباع فعال آبخوان شود. این مکانیسم که به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک رایج است، در مطالعات بین‌المللی به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در تشدید پدیده شوری شناسایی شده است (Scanlon et al., 2006; UN-Water., 2020; Alfarrah & Walraevens, 2018).

در برخی مدل‌سازی‌های عددی، مانند مطالعه موردی در دلتای رودخانه میکونگ ، مشخص شده که برداشت بی‌رویه باعث نفوذ جبهه آب شور تا چندین کیلومتر به درون آبخوان و افزایش محسوس غلظت کلرید شده است (Minderhoud et al., 2018; Yeh et al., 2009). بنابراین، برداشت بیش‌ازحد نه‌تنها می‌تواند ظرفیت رقیق‌سازی را کاهش دهد، بلکه به‌عنوان یک عامل هیدرودینامیکی فعال، موجب فعال‌شدن لایه‌های شور عمیق یا پیرامونی می‌گردد که در شرایط تراز نرمال در تماس مستقیم با جریان آب زیرزمینی قرار ندارند؛ اما افت تراز ناشی از برداشت بی‌رویه می‌تواند موجب گسترش ناحیه اشباع به اعماق یا پهنه‌هایی شود که حاوی سنگ‌های تبخیری، مارن‌های نمک‌دار یا نواحی با شوری بالا هستند. در این شرایط، تماس تازه یا گسترده‌تری میان آب و این لایه‌ها برقرار شده، و ورود املاح به جریان آبخوان را تسهیل می‌کند (Custodio, 2010;

.Jalali, 2007; AfradIrani et all, 2025)

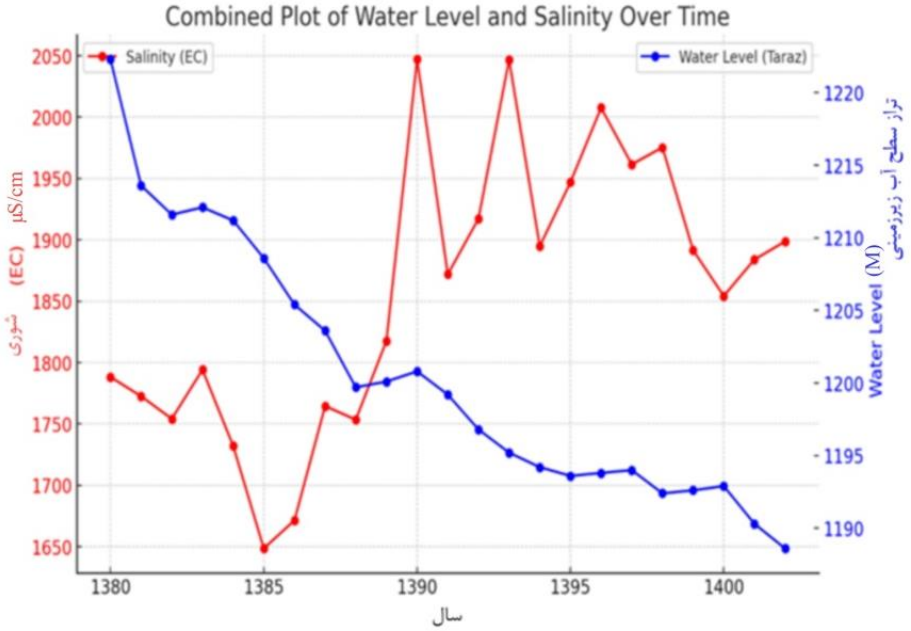
بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که برداشت بی‌رویه به‌طور علمی و تجربی یکی از عوامل مهم در افزایش شوری به‌شمار می‌رود. همانطور که در تحلیل نمودار تغییرات تراز آب هم اشاره شد که روند نزولی تراز آب با روندی متوسط رخ داده است.

اما در بازه سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۰ بارندگی افزایش‌یافته و نمک‌های ذخیره شده در لایه‌های خاک را شسته و به آب زیرزمینی انتقال داده است و علت این پیک افزایش شوری در سال ۱۳۹۰ نیز به احتمال زیاد همین می‌باشد، علاوه بر آن‌که زراعت بی رویه نیز مزید بر علت می‌باشد. کاهش بارش در زمان خشک‌سالی به معنای ورودی کم‌تر آب شیرین به آبخوان‌های آب زیرزمینی است و این کاهش ورودی آب باعث می‌شود که شوری طبیعی آب‌ها، به ویژه در مناطق نیمه‌خشک و خشک، بیش‌تر نمایان شود. همچنین، با کاهش بارش، مقدار آب کم‌تری برای رقیق‌سازی نمک‌ها در آب‌های زیرزمینی وجود دارد که این موضوع سبب افزایش غلظت نمک‌ها و در نتیجه شوری آب می‌شود. در دوره‌های خشک‌سالی، کشاورزان و کاربران دیگر به دلیل کمبود آب سطحی، بیش‌تر به استخراج آب از منابع زیرزمینی متکی می‌شوند که این امر می‌تواند منجر به کاهش سطح آب زیرزمینی و افزایش غلظت نمک‌ها گردد. در زمان‌های کم‌آبی، به دلیل تبخیر بالای آب از سطح خاک، نمک‌ها به سطح آمده و در نهایت آب زیرزمینی را شورتر می‌کنند. این عوامل به‌طور جمعی سبب می‌شوند که خشک‌سالی نه تنها بر کمیت آب تأثیر بگذارد، بلکه کیفیت آن را نیز به شدت تحت تأثیر قرار دهد. در بررسی روند تغییرات شوری آب از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲، در دوره اول نوسانات جزئی دیده می‌شود. سپس در سال ۱۳۹۰ یک پیک قابل‌توجه مشاهده می‌شود. در تایباد، پیک اصلی شوری زودتر (۱۳۸۷–۱۳۸۸) رخ داده بود، اما در حوالی سال ۱۳۹۰ نیز شوری همچنان در سطح بالا باقی ماند. دلیل این تفاوت آن است که تایباد برخلاف قزوین کمتر تحت تأثیر چرخه‌های ترسالی–خشک‌سالی است و بیشتر تحت تأثیر افت ساختاری تراز، کاربری اراضی فقیر و تمرکز برداشت در شرق دشت قرار دارد. بنابراین، در حالی‌که قزوین در سال ۱۳۹۰ یک پیک ناشی از ترسالی تجربه کرد، تایباد در همین سال درگیر پیامدهای پیک قبلی و شورکشی ناشی از افت تراز بود. در دوره ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۳: در قزوین این دوره با یک جهش در شوری (سال ۱۳۹۰) و افزایش تراز آب زیرزمینی همراه است. افزایش تراز ممکن است باعث تماس بیش‌تر آب با لایه‌های نمک‌دار شده باشد و شوری را به اوج خود برساند. پس از این افزایش، تراز آب کاهش یافته و شوری نیز کاهش می‌یابد. این الگوی نوسانی نشان می‌دهد که وقتی تراز افزایش‌یافته و به منابع نمکی تماس پیدا می‌کند، شوری افزایش می‌یابد و با کاهش تراز، تماس کمتر و شوری کاهش می‌یابد .در تایباد، این دوره با نوسان شوری همراه است. شوری کمی کاهش می‌یابد اما همچنان در سطح بالا باقی می‌ماند. دلیل این تفاوت آن است که در تایباد برخلاف قزوین، افزایش تراز محسوس نیست و آبخوان همچنان در مسیر افت قرار دارد. بنابراین، رقیق‌سازی مؤثر رخ نمی‌دهد و شوری تنها به‌صورت محدود کاهش می‌یابد. نقش شورکشی و زهاب کشاورزی در این دوره همچنان غالب است. دوره ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۹: در قزوین در این بازه، تراز آب زیرزمینی کاهش می‌یابد و شوری با نوساناتی همراه است. شوری در سال ۱۳۹۶ به بالاترین مقدار خود می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. این وضعیت می‌تواند ناشی از افزایش برداشت‌ها، کاهش منابع آب، غلیظ‌تر شدن آب و دوره‌هایی از شورکشی باشد.

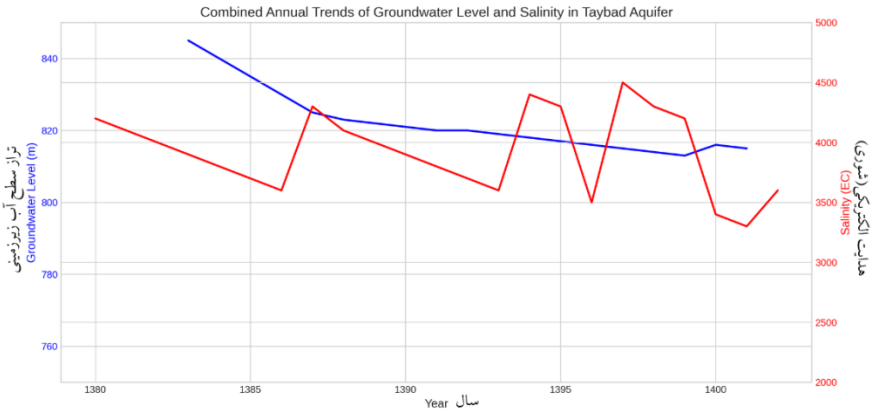
در تایباد، همین بازه زمانی با پیک‌های جدید شوری همراه است. افت ساختاری تراز موجب تماس آبخوان با لایه‌های شور عمیق‌تر یا جانبی شده و زهاب‌های کشاورزی نیز به‌طور مزمن وارد آبخوان می‌شوند. برخلاف قزوین که پیک‌های شوری بیش‌تر تابع چرخه‌های اقلیمی‌اند، در تایباد این پیک‌ها بیشتر ناشی از شورکشی، کاهش رقیق‌سازی و تماس با لایه‌های شور هستند. نوسانات شدید شوری در این دوره نشان‌دهنده کاهش شدید ظرفیت رقیق‌سازی آبخوان است. دوره ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲: درقزوین تراز آب زیرزمینی در این دوره به پایین‌ترین مقدار خود می‌رسد و شوری به‌طور نسبی افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که با کاهش تراز و کاهش میزان آب موجود، غلظت نمک‌ها افزایش‌یافته و شوری بالاتر می‌رود. در این دوره، تأثیرات کشاورزی و زهاب‌های آن می‌تواند به‌صورت تدریجی باعث افزایش شوری شده باشد. در تایباد نیز همین بازه زمانی با کم‌ترین تراز و تثبیت شوری در سطح بالا همراه است. آبخوان تایباد مانند قزوین وارد فاز فرسودگی کیفی شده، اما شدت این فرسودگی در تایباد بیشتر ناشی از کاربری اراضی فقیر، تمرکز برداشت در شرق دشت و شورکشی است، در حالی‌که در قزوین نقش توسعه شهری و نفوذ فاضلاب نیز پررنگ است. مطالعه اثرات افت سطح ایستابی بر میزان شوری آب زیرزمینی در دشت قزوین نشان می‌دهد که کاهش تراز آب زیرزمینی معمولاً با افزایش شوری همراه است، اما این الگو در تمام مناطق صدق نمی‌کند و در برخی شرایط، روند معکوس نیز مشاهده شده است. افت سطح آب با کاهش تغذیه آب شیرین به آبخوان‌ها، شرایطی را برای تجمع نمک‌ها در خاک فراهم می‌کند؛ به‌ویژه در مناطقی با فعالیت کشاورزی گسترده و برداشت شدید از منابع آب زیرزمینی. همچنین، نقشه کاربری اراضی نشان می‌دهد که مجاورت با مناطق شهری فاقد پوشش سبز یا فضای باغی، با کیفیت نامناسب آب‌های زیرزمینی مرتبط است. در این مناطق، ورود فاضلاب‌های خانگی، شهری و صنعتی به آبخوان‌ها موجب افزایش شوری و کاهش کیفیت منابع آب شده است. این وضعیت می‌تواند پیامدهای منفی برای کشاورزی، منابع طبیعی و سلامت زیست‌محیطی منطقه داشته باشد. در نمودارهای (شکل ۸ الف و ب)، تغییرات هم‌زمان تراز و

شوری آب زیرزمینی در بازه‌ی زمانی هر دشت به تصویر کشیده شده است. این نمودارها نشان‌دهنده‌ی روند غالب افزایش شوری همزمان با افت سطح ایستابی است، به‌ویژه در مناطقی با فعالیت‌های صنعتی و شهری که تخلیه پساب و مصرف بالا، فشار مضاعفی بر منابع آب وارد می‌کند.

تحلیل روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت‌های قزوین و تایباد بر اساس داده‌های تراز سطح ایستابی و هدایت الکتریکی آب زیرزمینی (EC) انجام شد. داده‌های مربوط به دشت قزوین از شرکت آب منطقه‌ای قزوین و داده‌های دشت تایباد از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی اخذ گردید که متولیان رسمی پایش منابع آب زیرزمینی در این مناطق هستند. این داده‌ها مطابق دستورالعمل‌های فنی وزارت نیرو و از طریق اندازه‌گیری‌های سالانه در چاه‌های مشاهده‌ای جمع‌آوری شده‌اند. داده‌های مورد استفاده برای دشت قزوین مربوط به بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ و برای دشت تایباد مربوط به دوره ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۱ می‌باشند. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که در هر دو دشت روند افت سطح ایستابی با تغییرات کیفی آب زیرزمینی همراه بوده است.



شکل ۸ – الف- ارزیابی توامان نمودارهای شوری و تراز سطح آب زیرزمینی[۱]- دشت قزوین (۱۳۸۰-۱۴۰۲)

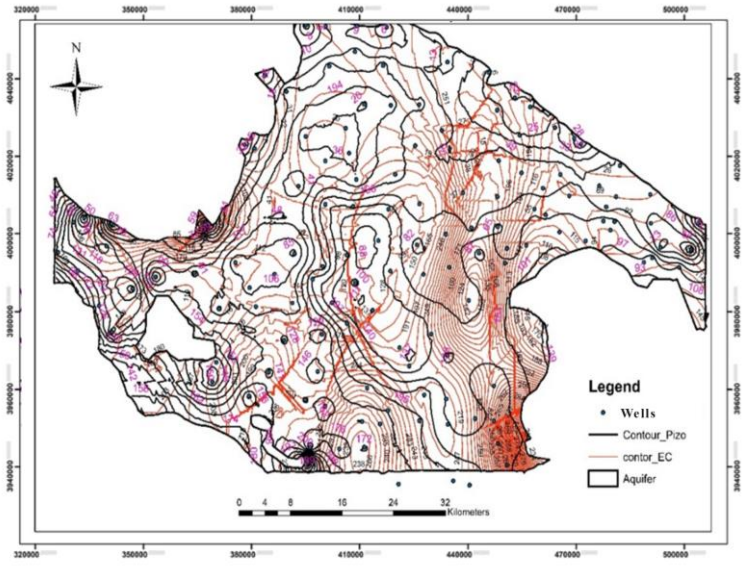


شکل ۸ - ب- ارزیابی توامان نمودارهای شوری و تراز سطح آب زیرزمینی – دشت تایباد (۱۳۸۳-۱۴۰۱)

۱- شوی آب زیرزمینی برحسب میکروزیمنس بر سانتی‌متر و تراز سطح آب زیرزمینی برحسب متر

کاهش سطح آب زیرزمینی موجب کاهش فشار هیدرواستاتیک در آبخوان شده و در نتیجه می‌تواند حرکت آب‌های شور از لایه‌های عمیق‌تر یا نواحی پیرامونی به سمت منابع آب شیرین را تسهیل کند. علاوه بر این، در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک با نرخ تبخیر بالا که در هر دو منطقه حاکم است، افت سطح آب زیرزمینی می‌تواند موجب تمرکز املاح در آبخوان و در نتیجه افزایش شوری آب زیرزمینی شود. بررسی داده‌های دشت قزوین نشان می‌دهد که طی دوره ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ مقدار هدایت الکتریکی آب زیرزمینی از ۱۷۸۸/۳به ۱۸۹۸/۷ میکروزیمنس بر سانتی‌متر افزایش یافته است که بیانگر افزایش حدود ۶ درصدی در میزان شوری آب زیرزمینی طی این دوره می‌باشد. در دشت تایباد نیز نتایج تحلیل داده‌های دوره ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۱ نشان می‌دهد که مقدار هدایت الکتریکی آب زیرزمینی از حدود ۳۶۰۰ به ۳۷۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر افزایش یافته است که بیانگر افزایش تقریبی ۳ درصدی شوری آب زیرزمینی در این دشت است. با این حال، بررسی روند زمانی داده‌ها نشان می‌دهد که در دشت تایباد نوسانات قابل توجهی در مقادیر EC مشاهده می‌شود و در برخی سال‌ها افزایش‌های مقطعی قابل توجهی ثبت شده است، اما روند کلی دوره مورد بررسی افزایش ملایم شوری را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج دو دشت نشان می‌دهد که اگرچه هر دو منطقه با افت سطح آب زیرزمینی مواجه هستند، اما شدت و الگوی تغییرات کیفی آب زیرزمینی در آن‌ها متفاوت است. در حالی که در دشت قزوین روند افزایش شوری نسبتاً یکنواخت‌تر مشاهده می‌شود، در دشت تایباد تغییرات شوری بیشتر به صورت نوسانی ظاهر شده و افزایش خالص آن در طول دوره مورد بررسی محدودتر بوده است. این تفاوت می‌تواند ناشی از شرایط هیدروژئولوژیکی متفاوت، الگوهای بهره‌برداری از آب زیرزمینی و نوع کاربری اراضی در دو منطقه باشد.

نتایج این مطالعه با یافته‌های مطالعات پیشین که به ارتباط میان برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، تغییرات کاربری اراضی و افزایش شوری آبخوان‌ها اشاره کرده‌اند همخوانی دارد. برای بررسی دقیق‌تر این ارتباط، در شکل ۹ نقشه‌های تغییرات تراز سطح ایستابی و شوری آب زیرزمینی در دشت‌های قزوین و تایباد برهم‌نهی شده‌اند تا با تحلیل همزمان این متغیرها و بررسی الگوهای کاربری زمین، ارتباط فضایی میان افت سطح آب زیرزمینی و تغییرات کیفیت آب با دقت بیشتری مورد ارزیابی قرار گیرد (Dang et al., 2019; Dalir et al., 2026).



شکل ۹- خطوط هم‌تراز تغییرات شوری آب و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲- دشت قزوین

تحلیل نقشه ترکیبی تراز و شوری آب زیرزمینی دشت قزوین نشان‌دهنده ارتباط پیچیده و منطقه‌ای بین تغییرات سطح ایستابی و غلظت املاح محلول است. در نواحی جنوبی و جنوب‌شرقی، با وجود تراز آب نسبتا بالا (۱۴۰–۲۰۰ متر)، شوری بالایی نسبت به سایر بخش‌های آبخوان ثبت شده که ناشی از تماس با خاک‌های شور، ورود آب‌های شور یا شست‌وشوی نمک‌های سطحی می‌باشد. در مناطق مرکزی و غربی، افت تراز آب به حدود ۱۰۶–۱۰۸ متر همراه با افزایش شوری قابل توجه است که به دلیل برداشت بی‌رویه آب و تغلیظ نمک‌ها رخ می‌دهد. داده‌های کاربری اراضی نیز تراکم بالای کشاورزی و برداشت شدید منابع زیرزمینی را تایید می‌کند. در مقابل،

نواحی شمالی و شمال‌شرقی با تراز بالاتر (۲۵–۶۳ متر) و شوری پایین‌تر(<۵۰ میکروزیمنس/سانتی‌متر) تحت تاثیر منابع آب شیرین ناشی از بارش‌های کوهستانی و رودخانه‌ها قرار دارند. هم‌پوشانی خطوط کنتور شوری و تراز آب، به ویژه در مناطق مرکزی و جنوب‌شرقی، نشان‌دهنده نفوذ آب‌های شور به لایه‌های کم‌عمق‌تر و کاهش فشار هیدرواستاتیک است. نتایج کلی بیانگر این است که افت سطح آب زیرزمینی با افزایش شوری همراه بوده و عوامل ژئوهیدرولوژیک، کاربری اراضی و شرایط اقلیمی نقش مهمی در کیفیت آب دارند. این موضوع ضرورت مدیریت یکپارچه منابع و پایش مستمر را برجسته می‌کند(مقدم و خلقی، ۱۴۰۴).

تحلیل حکمرانی آب زیرزمینی در آبخوان‌های قزوین و تایباد

حکمرانی آب زیرزمینی در ادبیات جهانی مفهومی چندبعدی است که فراتر از مدیریت فنی منابع آب قرار می‌گیرد و مجموعه‌ای از سازوکارهای نهادی، چارچوب‌های قانونی، مشارکت اجتماعی، ابزارهای مدیریتی و پیامدهای محیط‌زیستی و اجتماعی را در بر می‌گیرد. پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهند که کیفیت حکمرانی آبخوان‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری منابع آب، تاب‌آوری اجتماعی و حتی شکل‌گیری مهاجرت‌های محیط‌زیستی دارد (Foster & Garduño, 2013; Gerlak et al., 2011; Varady et al., 2016; Puri & Aureli, 2019). این ادبیات تأکید می‌کند که حکمرانی آبخوان‌ها، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تنها با اتکا به ابزارهای فنی قابل مدیریت نیست و نیازمند ساختارهای نهادی کارآمد، قوانین شفاف، مشارکت فعال ذی‌نفعان و سازوکارهای داده‌محور است. در آبخوان‌های فرامرزی، پیچیدگی حکمرانی به‌مراتب بیشتر است. مدیریت این آبخوان‌ها مستلزم وجود نهادهای مشترک، توافق‌نامه‌های الزام‌آور و سازوکارهای تبادل داده است؛ در حالی که طبق گزارشFAO ، از میان ۲۷۳ آبخوان فرامرزی شناسایی‌شده در جهان، تنها پنج توافق‌نامه رسمی وجود دارد و هیچ چارچوب حقوقی جامع و الزام‌آوری برای مدیریت یکپارچه این آبخوان‌ها تصویب نشده است. تجربه‌های موفقی مانند کمیسیون مشترک کانادا و آمریکا (IJC)نشان می‌دهد که وجود نهادهای فراملی می‌تواند از طریق یادگیری اجتماعی، تولید دانش مشترک و تبادل داده‌های فنی، همکاری پایدار را تضمین کند. در مقابل، نمونه‌هایی مانند آبخوان گواتمالا–بلیز نشان می‌دهد که نبود نهادهای ملی و مشترک، فقدان داده و هم‌پوشانی وظایف نهادی می‌تواند به شکست همکاری منجر شود. در این چارچوب، مقایسه حکمرانی آبخوان قزوین به‌عنوان یک آبخوان داخلی و آبخوان تایباد به‌عنوان یک آبخوان مرزی، تصویری روشن از تفاوت‌های نهادی، اجتماعی و محیط‌زیستی ارائه می‌دهد. آبخوان قزوین تحت نظام حکمرانی نسبتاً متمرکز قرار دارد؛ نهادهای متولی آب در سطح ملی و استانی از اختیارات مشخصی در زمینه صدور مجوز، پایش و اعمال محدودیت‌های برداشت برخوردارند و قوانین ملی در این منطقه قابلیت اجرا دارند. این تمرکز نهادی امکان اعمال سیاست‌های کنترلی را فراهم کرده است، هرچند ضعف مشارکت اجتماعی و محدود بودن نقش بهره‌برداران همچنان یکی از چالش‌های اصلی آن است. در مقابل، آبخوان تایباد در منطقه‌ای مرزی قرار دارد که حکمرانی آن تحت تأثیر شکنندگی نهادی، نبود توافق‌نامه‌های الزام‌آور با کشور همسایه، ضعف تبادل داده و فشارهای اجتماعی–اقتصادی ناشی از مهاجرت قرار دارد. در چنین شرایطی، مشارکت ذی‌نفعان نه یک انتخاب، بلکه یک ضرورت حکمرانی است؛ زیرا معیشت محلی به‌شدت به آب زیرزمینی وابسته است و هرگونه کاهش دسترسی به آب می‌تواند به نارضایتی اجتماعی و مهاجرت اجباری منجر شود.

ساختار نهادی و چارچوب قانونی

در ادامه، تفاوت‌های نهادی و قانونی دو آبخوان در قالب جدول زیر نشان داده شده است:

مشارکت ذی‌نفعان و مشروعیت حکمرانی

در آبخوان قزوین، حکمرانی عمدتاً بالابه‌پایین است و مشارکت بهره‌برداران محدود است. اما در تایباد، مشارکت اجتماعی نقش حیاتی دارد.

جدول ۱- مقایسه ساختار نهادی و چارچوب قانونی آبخوان‌های قزوین و تایباد

مؤلفه	قزوین	تایباد
انسجام نهادی	بالا	پایین
شفافیت مسئولیت‌ها	خوب	مبهم
ضمانت اجرای قوانین	نسبتاً قوی	ضعیف
نیاز به هماهنگی بین‌حوزه‌ای	کم	بسیار زیاد
وابستگی به همکاری خارجی	ندارد	بسیار بالا

این جدول نشان می‌دهد که قزوین از نظر نهادی «قابل مدیریت» است، در حالی که تایباد «شکننده و وابسته به همکاری فرامرزی» است.

جدول ۲- مقایسه نقش مشارکت ذی‌نفعان در دو آبخوان

شاخص	قزوین	تایباد
الگوی تصمیم‌گیری	متمرکز	مشارکتی
نقش بهره‌برداران	محدود	حیاتی
مشروعیت اجتماعی	متوسط	بسیار حساس
احتمال تعارض	متوسط	بالا

ابزارهای مدیریتی و ظرفیت اجرایی

جدول ۳- مقایسه ابزارهای مدیریتی

شاخص	قزوین	تایباد
شبکه پایش	نسبتاً کامل	ناقص
تبادل داده	داخلی	دشوار و فرامرزی
کارایی ابزارها	متوسط–بالا	پایین
ظرفیت اجرایی	مناسب	محدود

پیامدهای محیط‌زیستی، اجتماعی و مهاجرتی

جدول ٤- پیامدهای حکمرانی در دو آبخوان

پیامد	قزوین	تایباد
شدت تخریب محیط‌زیستی	بالا اما موضعی	شدید و فراگیر
آسیب‌پذیری اجتماعی	متوسط	بالا
فشار مهاجرتی	کم	بسیار زیاد
تاب‌آوری نهادی	متوسط	پایین

جدول ۵- ماتریس مقایسه زوجی معیارهای حکمرانی

معیار	نهادی	قانونی	مشارکت	ابزار	محیط‌زیست	اجتماعی	مهاجرت
ساختار نهادی	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲
چارچوب قانونی	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲
مشارکت ذی‌نفعان	۱	۱	۱	۲	۲	۳	۳
ابزارهای مدیریتی	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۱	۱	۲	۲
محیط‌زیست	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۱	۲	۲	۲
اجتماعی	۰/۵	۰/۵	۰/۳۳۳	۰/۵	۰/۵	۱	۲
مهاجرت	۰/۵	۰/۵	۰/۳۳۳	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۱

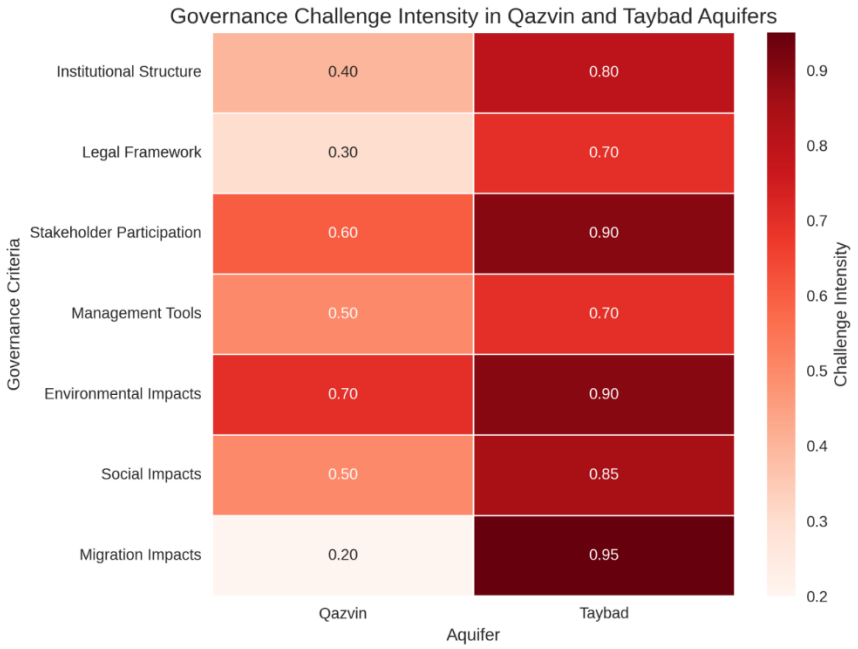
مدل AHP حکمرانی آبخوان‌ها

برای تحلیل کمی حکمرانی، از روش AHP استفاده شد. هفت معیار اصلی شامل ساختار نهادی، چارچوب قانونی، مشارکت ذی‌نفعان، ابزارهای مدیریتی، پیامدهای محیط‌زیستی، پیامدهای اجتماعی و

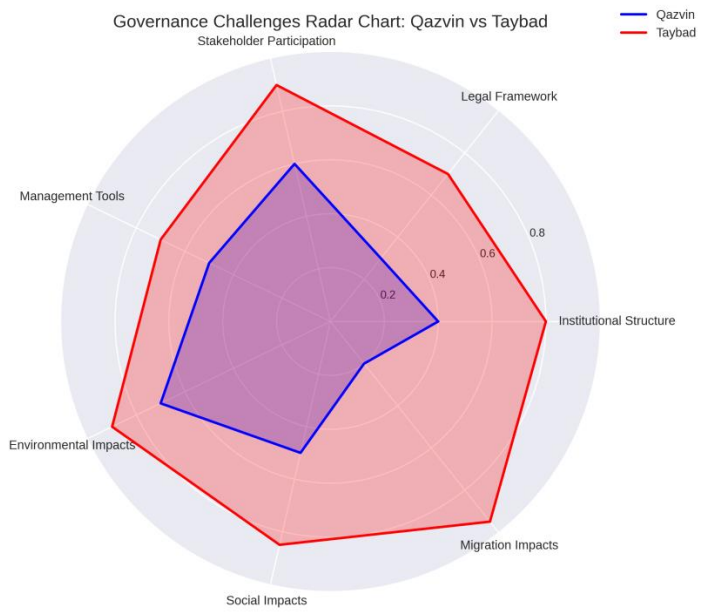
پیامدهای مهاجرتی انتخاب شدند. تنظیم شده و نرخ ناسازگاری آن کمتر از ۰/۰۸ است.

وزن نهایی معیارها

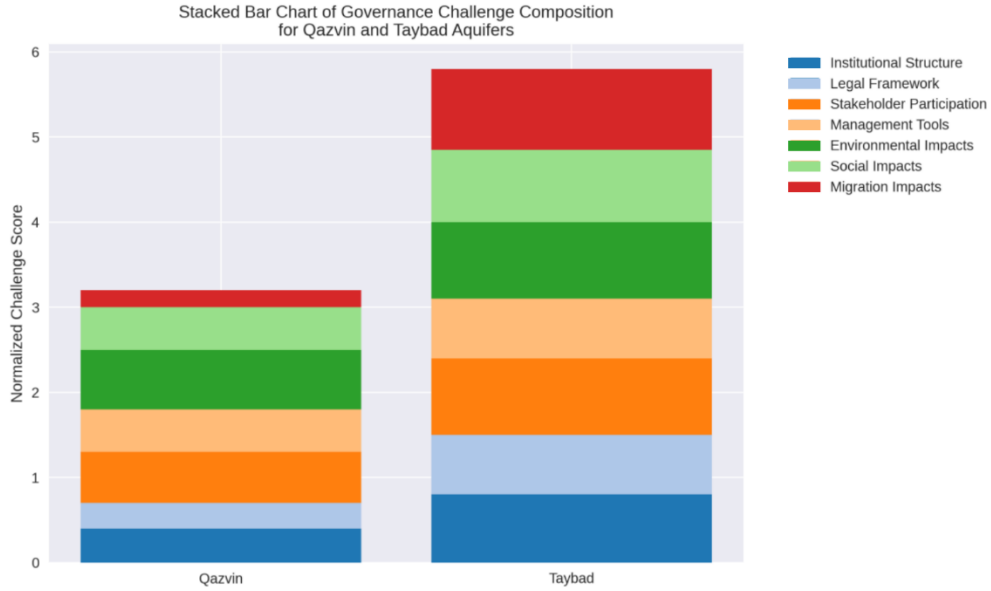
این ماتریس بر اساس ادبیات جهانی و شرایط بومی قزوین–تایباد



شکل ۱۰- نقشه حرارتی شدت نسبی چالش‌های حکمرانی در آبخوان‌های قزوین و تایباد



شکل ۱۱- الف. نمودار اسپایدر مقایسه‌ای حکمرانی آبخوان‌های قزوین و تایباد بر اساس هفت معیار حکمرانی



شکل ۱۱- ب. نمودار میله‌ای انباشته ترکیب چالش‌های حکمرانی در آبخوان‌های قزوین و تایباد بر اساس هفت معیار اصلی حکمرانی

جدول ٦- وزن نهایی معیارهای حکمرانی

معیار	وزن
مشارکت ذی‌نفعان	۰/۲۰۵
ساختار نهادی	۰/۱۷۵
چارچوب قانونی	۰/۱۶۵
ابزارهای مدیریتی	۰/۱۴۵
پیامدهای محیط‌زیستی	۰/۱۳۰
پیامدهای اجتماعی	۰/۱۱۰
پیامدهای مهاجرتی	۰/۰۷۰

نتیجه‌گیری

دشت قزوین، افت تراز آب زیرزمینی پدیده‌ای نسبتاً گسترده و فراگیر در مقیاس دشت است، به‌گونه‌ای که در بخش‌های وسیعی از دشت کاهش سطح ایستابی مشاهده می‌شود و بیشترین افت در نواحی با تمرکز کاربری‌های زراعی و مجاورت با مراکز شهری رخ داده است. این الگو بیانگر فشار برداشت بلندمدت از منابع آب زیرزمینی، گسترش فعالیت‌های کشاورزی و شهری، و کاهش تدریجی تغذیه طبیعی آبخوان است. افزایش شوری در این دشت نیز روندی تدریجی و نسبتاً گسترده دارد و همزمانی آن با افت سطح ایستابی نشان می‌دهد که فرآیندهایی مانند کاهش تغذیه، تمرکز املاح محلول و ورود تدریجی آلاینده‌ها در تضعیف کیفیت آب زیرزمینی نقش داشته‌اند. در مقابل، تغییرات سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت تایباد از نظر مکانی الگوی ناهمگن‌تری نشان می‌دهد. بیشترین افت تراز در بخش‌های شرقی دشت و در مجاورت نواحی مرزی مشاهده می‌شود، در حالی که سایر بخش‌های دشت کاهش کمتری را تجربه کرده‌اند. افزایش شوری در دشت تایباد نیز برخلاف دشت قزوین، عمدتاً در پهنه‌های مشخصی از دشت مشاهده می‌شود؛ به‌ویژه در نواحی شرقی که هم‌زمان با افت شدید سطح ایستابی، تبخیر بالا و محدودیت تغذیه آبخوان همراه بوده‌اند. این شرایط موجب تمرکز موضعی املاح و تشدید فرآیند شوری در این بخش‌ها شده است. به‌طور کلی، دشت قزوین نمونه‌ای از آبخوانی با افت سطح ایستابی و افزایش شوری نسبتاً گسترده و تدریجی در مقیاس دشت است که تحت تأثیر فشارهای انسانی مستمر و بلندمدت قرار دارد. در مقابل، دشت تایباد نمونه‌ای از آبخوانی است که افت سطح ایستابی و افزایش شوری در آن به‌صورت موضعی و شدید رخ داده و این تغییرات عمدتاً در نواحی با تمرکز برداشت آب زیرزمینی و

کاربری‌های کشاورزی در بخش‌های شرقی دشت مشاهده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که حتی با وجود قرارگیری هر دو دشت در اقلیم خشک تا نیمه‌خشک ایران، پاسخ آبخوان‌ها به فشارهای انسانی می‌تواند به‌شدت تحت تأثیر ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان، الگوی بهره‌برداری از منابع آب و توزیع فضایی فعالیت‌های انسانی قرار گیرد. نتایج تحلیل حکمرانی نیز نشان می‌دهد که آبخوان قزوین نمونه‌ای از حکمرانی نسبتاً متمرکز اما کم‌مشارکت است که توان نهادی آن تا حدی آثار تخریب محیط‌زیستی را مهار کرده است. در مقابل، آبخوان تایباد نمونه‌ای از حکمرانی شکننده در یک زمینه مرزی است که در آن ضعف نهادی و قانونی، فشارهای محیط‌زیستی را به چالش‌های اجتماعی و مهاجرتی تبدیل کرده است. وزن‌های AHP نشان می‌دهد که مشارکت ذی‌نفعان مهم‌ترین معیار حکمرانی در هر دو آبخوان است، اما در تایباد، پیامدهای اجتماعی و مهاجرتی نقش بسیار پررنگ‌تری دارند. در قزوین، ساختار نهادی و ابزارهای مدیریتی تعیین‌کننده‌تر هستند. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که حکمرانی آبخوان‌ها باید بومی، زمینه‌محور و متناسب با ویژگی‌های اجتماعی–نهادی هر منطقه طراحی شود.

پیشنهادها

با توجه به ماهیت همزمان تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی در دشت‌های مورد مطالعه، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده از رویکرد «ردپای یکپارچه آب زیرزمینی» برای ارزیابی وضعیت آبخوان‌ها استفاده شود. این رویکرد می‌تواند با تلفیق شاخص‌های کمی (مانند تغییرات سطح ایستابی و حجم برداشت) و شاخص‌های کیفی (از جمله هدایت الکتریکی و سایر پارامترهای شیمیایی) تصویری جامع از فشار وارد بر منابع آب زیرزمینی ارائه دهد. یکی از مزیت‌های این چارچوب، تبدیل مجموعه‌ای از متغیرهای هیدروژئولوژیکی به شاخص‌ها یا مقادیر قابل مقایسه در یک زبان تحلیلی واحد است که امکان ارزیابی همزمان وضعیت کمّی و کیفی آبخوان را فراهم می‌کند.

به‌کارگیری این رویکرد در دشت‌های قزوین و تایباد می‌تواند در مطالعات آتی به درک دقیق‌تر تعامل میان افت سطح ایستابی و تغییرات شوری کمک کرده و مبنای مناسب‌تری برای تحلیل‌های حکمرانی آب زیرزمینی و مقایسه فشارهای وارد بر آبخوان‌ها در مقیاس‌های مکانی مختلف فراهم سازد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان مقاله حاضر وجود ندارد.

منابع

آزادگان، ب.، حنفی، ح.، وراوی‌پور، م. و کاردان‌مقدم، ح. ۱۴۰۳. شبیه‌سازی عددی آبخوان دشت تایباد با استفاده از MODFLOW و پیش‌بینی سناریوهای مدیریتی. مدیریت آب و آبیاری. ۱۴ (۲): ۳۴۳–۳۵۵.

توانا، ا.، شاهوردی، ک. و قدوسی، ح. ۱۴۰۴. توسعه روش یادگیری تقویتی معکوس به صورت تلفیق با مدل هیدرودینامیک ICSS در کانال دز. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۶ (۵): ۱۳۳۹–۱۳۵۳.

فخار، م. و کاویانی، ع. ۱۴۰۳. پایش خشکسالی در دشت قزوین با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر MODIS در محیط Google Earth Engine. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۷ (۶): ۱۰۸۹–۱۱۰۳.

جانباز فوتمی، م.، خلقی، م.، عبده کلاه‌چی، ع. و روستایی، م. ۱۴۰۲. عملکرد وزن‌دهی شواهد در GIS برای تعیین عوامل مؤثر بر فرونشست زمین در دشت قزوین. نشریه تحقیقات منابع آب ایران. ۱۹ (۳): ۱۱۸–۱۳۵.

رضایی، ر.، قدوسی، ج.، حسنی، ا.، ارجمندی، ر. و وفایی‌نژاد، ا. ۱۴۰۰. طبقه‌بندی و ارزیابی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat (مطالعه موردی: آبخوان دشت قزوین). فضای جغرافیایی. ۲۰ (۷۲): ۱۸۵–۲۰۴.

مقدم, ن.، و اشرف‌زاده, ا.، ۱۴۰۴. مدل‌سازی و بررسی پیش‌بینی شوری آب زیرزمینی دشت قزوین با رویکرد داده محور و هوش مصنوعی .تحقیقات منابع آب ایران.۲۱(۴): ۱۵۸–۱۷۵.

مقدم، ن.، و خلقی، م.، ۱۴۰۴. الگوی تحلیل افت سطح آب و تشدید شوری آب‌های زیرزمینی در دشت قزوین و پیامدهای آن از منظر حکمرانی منابع آب. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۹ (۳): ۴۶۹–۴۸۷.

مقدم، ن.، ۱۴۰۳. مدیریت منابع آب برای کاهش اثرات خشکسالی ناشی از تغییر اقلیم با تمرکز بر ایالت کالیفرنیا. نشریه تحقیقات منابع آب ایران. ۲۰ (۲): ۱۹۴–۲۱۷.

یزدان‌پناه، ا.، اکبری، م. و بهرامیان، ک. ۱۳۹۷. بررسی تغییرات زمانی–مکانی پارامترهای کمی و کیفی آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار (مطالعه موردی: دشت مشهد). مجله حفاظت آب و خاک. ۶ (۲۰): ۱–۱۲.

AfradIrani, P., Kosari, S., Parsinejad, M. and others. 2025. Predicted feasibility of sustainable irrigation best management practices for reducing water consumption and enhancing water productivity. Sustainable Water Resources Management. 11: 83.

https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.416388.670156

Jalali, M. 2007. Salinization of groundwater in arid zones: A case study. Environmental Geology. 52 (6): 1133–1149.

Konikow, L.F. and Kendy, E. 2005. Groundwater depletion: A global problem. Hydrogeology Journal. 13 (1): 317–320.

Li, B., Rodell, M., Kumar, S., Beaudoing, H.K., Getirana, A., Zaitchik, B.F. and Peters-Lidard, C.D. 2021. Evaluation of GRACE terrestrial water storage estimates over global river basins using in situ observations. Journal of Hydrology. 595: 125657.

Minderhoud, P.S.J. and others. 2018. Subsidence and salinization in Mekong Delta. Science of the Total Environment. 645: 1348–1361.

Mishra, N. and Kumar, S. 2015. Impact of land use change on groundwater recharge in Haridwar District. Proceedings of the International Conference on Hydraulics, Water Resources and River Engineering.

Moghaddam, N., Hadizadeh, H. and Ashrafzadeh, A. 2025. Data-driven analysis for estimating and predicting well salinity using artificial intelligence algorithms. Discover Applied Sciences.

Moghaddam, N., Kholghi, M. & Ashrafzadeh, A. 2026. Multi-method baseflow separation and quantitative groundwater footprint estimation in the Fariman–Torbat Jam basin at the Iran–Afghanistan border. Earth Sci Inform 19, 170. https://doi.org/10.1007/s12145-026-02227-2

Puri, S. and Aureli, A. 2019. Transboundary aquifers: A global programme to assess, manage and govern groundwater resources. Environmental Earth Sciences. 78 (15): 454.

Ramillien, G., Famiglietti, J.S. and Wahr, J. 2008. Detection of continental hydrology and glaciology signals from GRACE: A review. Surveys in Geophysics. 29: 361–374.

Rengasamy, P. 2006. World salinization with emphasis on Australia. Journal of Experimental Botany. 57 (5): 1017–1023.

Scanlon, B.R., Healy, R.W. and Cook, P.G. 2002. Techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal. 10 (1): 18–39.

Scanlon, B.R. and others. 2006. Global recharge in semiarid and arid regions. Hydrological Processes. 20 (15): 3335–3370.

Scanlon, B.R. and others. 2007. Impact of land cover change on water resources. Water Resources Research. 43 (3).

Scanlon, B.R. and others. 2018. Enhancing drought resilience in California and Arizona. Environmental Research Letters. 13 (9): 094010.

Alfarrah, N. and Walraevens, K. 2018. Groundwater overexploitation and seawater intrusion. Water. 10 (2): 143.

Bozorg-Haddad, O., Moghaddam, N., Salar-Khorasani, SM. And others. 2026. Flawed policies in dam construction and their hydropolitical ramifications: a case study of the Atatürk Dam. Sci Rep (2026). https://doi.org/10.1038/s41598-026-75724-5

Chen, Q. and others. 2016. Improved GRACE monthly gravity field solution. Journal of Geodesy. 90: 503–523.

Choi, W., Galasinski, U., Cho, S.J. and Hwang, C.S. 2012. A spatiotemporal analysis of groundwater level changes in relation to urban growth. Geographical Analysis. 44 (3): 219–234.

Clemens, M. and others. 2020. Groundwater protection under water scarcity in Jordan. Science of the Total Environment. 706: 136066.

Conti, K.I. and Gupta, J. 2021. Global groundwater governance: Challenges and opportunities. Water International. 46 (4): 495–512.

Custodio, E. 2010. Aquifer overexploitation: What does it mean?. Hydrogeology Journal. 18: 269–292.

Dalir G. A., Aiyoubi, M., & Soleimani, J. 2026. Evaluating theimpact of data correction on precipitation forecasting in semi-arid basinsusing machine learning models. Journal of Iranian Water EngineeringResearch. https://doi.org/10.22034/ijwer.2026.585587.1136

Dong, Y. and others. 2019. Groundwater level changes in agricultural areas of the Mid-Atlantic US, 2002–2016. Environmental Research. 171: 193–203.

Domenico, P.A. and Schwartz, F.W. 1990. Physical and chemical hydrogeology. John Wiley and Sons.

Foster, S. and Garduño, H. 2013. Groundwater-resource governance: Are governments and stakeholders responding to the challenge?. Hydrogeology Journal. 21 (2): 317–320.

Gabrabad, A. D., Hosseinpour, M., & Ashrafzadeh, A. 2026. Assessing the relative importance of machine learning modeling components for precipitation prediction using ANOVA. Water Challenges, 19, Article 204. https://doi.org/10.1007/s12145-026-02260-1

Gerlak, A.K., Varady, R.G., Petit, O. and Haverland, A.C. 2011. Hydrosolidarity and transboundary groundwater governance. International Environmental Agreements. 11 (4): 395–419.

Gabrabad, A. D., & Ashrafzadeh, A. 2026. Analyzing the effect of ensemble size and optimal weighting of machine learning models on the accuracy of monthly rainfall prediction. Iranian Journal of Soil and Water Research,

UN-Water. 2020. Water and climate change. United Nations.

Varady, R.G., Gerlak, A.K., Mumme, S.P. and Schorr, J.P. 2016. Transboundary groundwater governance. Earthscan.

Wang, S. and others. 2020. Groundwater sustainability in Hexi Corridor, China. Science of the Total Environment. 705: 135829.

Yeh, H.F. and others. 2009. Seawater intrusion model: Yun-Lin coast, Taiwan. Hydrogeology Journal. 17 (6): 1641–1656.

Suarez, D.L. 2001. Impact of agriculture on groundwater: San Joaquin Valley. Agricultural Impacts on Groundwater Quality. Springer. 39–57.

Suciu, N. and others. 2020. Groundwater contamination in vineyards of Italy. Science of the Total Environment. 749: 141495.

Tapley, B.D., Watkins, M.M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M. and Velicogna, I. 2023. Contributions of GRACE to understanding global water storage changes. Nature Reviews Earth and Environment. 4 (2): 85–99.

Tam, V.T. and Nga, T.T.V. 2018. Urbanization impact on groundwater in Hanoi. Journal of Environmental Management. 227: 107–116.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 20, Oct.-Nov. 2026, p. 587-610

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۲۰، مهر - آبان ۱۴۰۵، ص. ۶۱۰-۵۸۷

Quantitative and Qualitative Changes in Groundwater and Their Implications for Water Resources Governance: Evidence from the Taybad and Qazvin Plains

N. Moghaddam[1], M. Kholghi[2*], A. H. Tavana[3], A. Ashrafzadeh[4]

Recived: Jan.14, 2026 Accepted: Jun.17, 2026

Abstract

In recent decades, the decline of groundwater levels and the increasing salinity of aquifers have become among the most significant challenges in water resources management in arid and semi-arid regions. Excessive exploitation of groundwater resources, expansion of agricultural activities, and land-use changes are considered some of the most important factors intensifying this trend. However, the simultaneous assessment of quantitative and qualitative changes in groundwater and their relationship with land-use patterns has not yet been comprehensively investigated in many plains of the country.

The aim of this study is to analyze groundwater level fluctuations and water salinity and to examine the role of land-use changes in the Taybad and Qazvin plains. In this study, changes in groundwater resources were investigated in the Taybad plain during the period 2004–2022 and in the Qazvin plain during the period 2001–2023. For this purpose, groundwater level data, electrical conductivity (EC) measurements, and land-use maps were analyzed using statistical analysis, spatial interpolation methods, and Geographic Information System (GIS).

The results indicated that in the Qazvin plain, the groundwater level declined by approximately 1 meter per year on average, while water salinity increased by about 6%. In the Taybad plain, a significant decline in groundwater levels was also observed, with an estimated average annual decrease of about 2 meters, and groundwater salinity showed an overall increase of approximately 3% during the study period. Furthermore, the greatest changes were observed in urban areas and agricultural lands, indicating the significant role of human activities and land-use changes in intensifying groundwater depletion and aquifer salinization.

Keywords: Groundwater, Qazvin Plain, Taybad Plain, Water Salinity, Water Resources Governance

1- M.Sc. Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2- Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
3- M.Sc. Graduate, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran
4- Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
(*-Corresponding Author Email: kholghi@ut.ac.ir)